



Université catholique de Louvain



Centre de coopération internationale en  
recherche agronomique pour le  
développement

Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale  
Université catholique de Louvain

# Relations hydropédologiques au sein d'une séquence de sols dérivés de cendres volcaniques en Guadeloupe

Mémoire présenté en vue de l'obtention du titre de Bioingénieur en Sciences et  
Technologies de l'environnement

Par Nicolas FELTZ

Promoteurs :  
M. Javaux  
B. Delvaux

Encadrant local :  
P. Cattan

Année académique 2007-2008

## Remerciements

Au cours de cette année, je fus amené à rencontrer un certain nombre de personnes qui, de près ou de loin, participèrent à la réalisation de ce travail. Je tenais à les citer ici afin de leur témoigner ma reconnaissance la plus sincère.

Tout d'abord, je remercie mes promoteurs, messieurs Mathieu Javaux et Bruno Delvaux. Pour leur encadrement, leurs précieux conseils, leur confiance, et pour les nombreuses heures qu'ils m'ont consacrées, merci sincèrement.

En Guadeloupe, Philippe Cattan, du CIRAD, par son accueil, son encadrement et sa confiance, a fait en sorte que mon séjour soit une réussite complète, tant sur le plan professionnel que sur le plan humain. Je lui en suis très reconnaissant.

Je tenais également à remercier les chercheurs qui m'ont prodigué leurs conseils au détour d'un couloir ou d'une plantation de banane. Je pense en particulier à Marc Dorel, Carine Saison et Jean-Baptiste Charlier, et à ceux que je n'ai pas cités.

Mon attention toute particulière va maintenant à Germain Onapin et Colbert Béhary, qui m'ont non seulement accompagné tout au long de mes campagnes de mesures, mais qui m'ont également égayé de leurs sourires, leurs chansons, leurs pas de danse, qui m'ont nourri de leurs fruits et légumes, bref, qui m'ont fait découvrir une partie de la culture créole.

Enfin, je m'en voudrais de ne pas citer mes compagnons du quotidien, mémorants et chercheurs de passage, volontaires ou doctorants, avec qui j'ai passé des moments inoubliables. Je pense en particulier à Carine, Amélie, Rachel, Perrine, Fatima et Salah, et à tous les autres que je n'oublie pas.

De retour en Belgique, les nombreuses expériences réalisées n'auraient pu être menées à bien sans l'aide d'Anne Iserentant, de Claudine Givron et de Guido Rentmeesters. Leur aide me fut précieuse, de même que leur gentillesse. Merci.

De nombreux professeurs et mémorants furent sollicités à maintes reprises pour m'aider à solutionner des problèmes en tous genres. Ils sont trop nombreux pour être cités individuellement, et je lance donc un merci général aux unités SOLS et GERU. Je tenais toutefois à remercier particulièrement Mélanie Weynants, pour m'avoir aidé à plusieurs reprises lors de mes déboires avec Matlab.

Les semaines de rédaction qui précèdent la remise du travail écrit ne sont pas une période facile. Je tenais donc à remercier Jean pour sa compagnie et son soutien. Je remercie également les habitants de la Villa pour leur accueil.

Merci aussi à Corbette, pour les moments partagés au cours de ces années, qui se passent de commentaires.

Enfin, ma dernière pensée, et pas la moindre, va à mes parents, qui ont non seulement accepté de relire ce travail durant leurs vacances, mais qui m'ont aussi soutenu tout au long de mes études. Merci beaucoup, je ne le dirai jamais assez.

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>- 2 -</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>- 3 -</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>- 5 -</b>
<b>CONTEXTE GÉNÉRAL.....</b>	<b>- 7 -</b>
LA GUADELOUPE EN QUELQUES LIGNES.....	- 7 -
CLIMAT .....	- 7 -
<i>Pluviométrie .....</i>	- 7 -
<i>Température .....</i>	- 8 -
SOLS .....	- 9 -
<i>Andosols .....</i>	- 9 -
<i>Sols bruns andiques.....</i>	- 10 -
<i>Sols brun rouille à halloysite.....</i>	- 10 -
<i>Tendances générales de la séquence.....</i>	- 10 -
LA CULTURE DE LA BANANE .....	- 11 -
POLLUTION .....	- 12 -
<i>Eau, pluviométrie, agriculture : base du problème.....</i>	- 12 -
<i>Gestion et prévention : une réponse en deux volets.....</i>	- 13 -
<i>Situation actuelle.....</i>	- 13 -
<b>ETAT DE LA RECHERCHE.....</b>	<b>- 15 -</b>
HYDROPÉDOLOGIE .....	- 15 -
<i>Idee de base.....</i>	- 15 -
<i>Applications intéressantes pour notre étude.....</i>	- 16 -
SOLS .....	- 17 -
<i>Structure particulière et infiltration .....</i>	- 17 -
<i>Eléments de pédologie.....</i>	- 18 -
<b>HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS .....</b>	<b>- 21 -</b>
<b>MATÉRIEL ET MÉTHODE.....</b>	<b>- 22 -</b>
EXPÉRIENCES IN SITU .....	- 22 -
<i>Choix des sites .....</i>	- 22 -
<i>Echantillonnage.....</i>	- 23 -
<i>Infiltromètre à succion.....</i>	- 23 -
<i>Double anneau.....</i>	- 25 -
MESURES EN LABORATOIRE .....	- 28 -
<i>Propriétés physiques.....</i>	- 28 -
<i>Courbes caractéristiques.....</i>	- 28 -
<i>Paramètres pédologiques .....</i>	- 31 -
<b>RÉSULTATS.....</b>	<b>- 34 -</b>
DONNÉES PÉDOLOGIQUES .....	- 34 -
<i>Ferrihydrite .....</i>	- 34 -
<i>Allophane.....</i>	- 35 -
<i>Carbone total.....</i>	- 36 -
<i>Conclusion.....</i>	- 37 -
RÉTENTION D'EAU .....	- 38 -
<i>Paramètres physiques.....</i>	- 38 -
<i>Courbes de rétention .....</i>	- 38 -
<i>Equation de van Genuchten.....</i>	- 41 -
CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE.....	- 43 -
<i>Infiltration .....</i>	- 43 -
<i>Equation de Gardner.....</i>	- 45 -

<b>ANALYSE ET DISCUSSION .....</b>	<b>- 47 -</b>
CLASSIFICATION ET PARAMÈTRES PÉDOLOGIQUES .....	- 47 -
<i>Ferrihydrite</i> .....	- 47 -
<i>Allophane</i> .....	- 47 -
<i>Carbone total</i> .....	- 49 -
<i>Analyse comparative des moyennes</i> .....	- 50 -
<i>Conclusion</i> .....	- 50 -
PARAMÈTRES PÉDOLOGIQUES ET POROSITÉ.....	- 51 -
<i>Porosité</i> .....	- 51 -
<i>Macroporosité</i> .....	- 52 -
<i>Conclusion</i> .....	- 53 -
POROSITÉ ET COMPORTEMENT HYDRAULIQUE .....	- 55 -
<i>Macroporosité</i> .....	- 55 -
<i>Hydrostatique</i> .....	- 57 -
<i>Hydrodynamique</i> .....	- 59 -
<b>CLASSES PÉDOLOGIQUES ET COMPORTEMENT HYDRAULIQUE.....</b>	<b>- 61 -</b>
ANALYSE COMPARATIVE DES MOYENNES .....	- 61 -
<i>Infiltration</i> .....	- 61 -
<i>Courbe de conductivité</i> .....	- 62 -
<i>Conclusion</i> .....	- 62 -
ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES .....	- 63 -
ANALYSE FACTORIELLE DISCRIMINANTE .....	- 67 -
<i>Horizon A</i> .....	- 68 -
<i>Horizon B</i> .....	- 68 -
<i>Variables</i> .....	- 68 -
<i>Conclusion</i> .....	- 69 -
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>- 70 -</b>
<i>Remarque</i> .....	- 72 -
CONCLUSION.....	- 73 -
COMPARAISON AVEC DOREL ET AL (2000).....	- 74 -
PERSPECTIVES .....	- 75 -
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>- 76 -</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>- 78 -</b>
OUVRAGES REFERENCES DANS LE TEXTE .....	- 78 -
OUVRAGES DE REFERENCE.....	- 80 -
SITES INTERNET .....	- 80 -

## Introduction

La Guadeloupe est une île des Caraïbes de petite taille. Les ressources en eau y sont donc limitées. La culture de bananes y joue un rôle socio-économique important. Au cours des années 1980–1990, l'utilisation intensive de pesticides rémanents dans les sols, couplée à une forte pluviométrie, provoqua une pollution importante des nappes phréatiques, principales sources d'eau de consommation de l'île.

De nombreux moyens furent mis en œuvre pour régler ce problème et une énergie importante est aujourd'hui consacrée à la gestion de ce problème sur le long terme. Dans ce cadre, la modélisation du comportement hydrologique des régions de production bananière est une des priorités. Pour ce faire, il est nécessaire d'appréhender les transferts d'eau dans les nappes à grande échelle, et donc de s'intéresser au comportement hydraulique des sols concernés.

La topographie accidentée et la présence d'un gradient pluviométrique sur la zone concernée confèrent une très grande variabilité à ces sols. Evaluer leur comportement hydraulique sur base de la classification pédologique, détaillée et établie de longue date, apporterait un confort considérable pour la réalisation des modèles hydrologiques.

L'hydropédologie, discipline émergente combinant les acquis de la pédologie, de l'hydrologie et de la physique du sol, offre un cadre propice à cette démarche.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les liens qui existent entre les différents sols concernés et leurs principales caractéristiques pédologiques, puis de déterminer l'influence de ces paramètres sur la porosité, et enfin de montrer l'implication de la porosité sur le comportement hydraulique de ces sols.

L'accomplissement de ces différentes étapes a pour objectif de nous permettre d'évaluer ce comportement sur la seule base de la classification pédologique. Pour ce faire, nous ferons la distinction entre le comportement hydrostatique, principalement les processus de rétention d'eau, et le comportement hydrodynamique, réunissant infiltration et conductivité.

La première partie de ce mémoire sera consacrée à la mise en contexte de notre étude. Nous commencerons par présenter l'île, son climat et son agriculture. Nous décrirons ensuite avec précision les différents sols traités. Nous reviendrons alors plus en détail sur les problèmes de pollution rencontrés et sur l'implication de notre recherche dans leur gestion. Nous présenterons ensuite l'hydropédologie en tant que discipline, et nous terminerons enfin en détaillant les concepts les plus intéressants pour notre étude et en définissant les paramètres pédologiques à prendre en compte.

Les hypothèses et objectifs seront alors reformulés de manière claire et détaillée.

La deuxième partie sera consacrée à la présentation du matériel et des méthodes utilisés pour nos prises de mesures. Nous commencerons par les mesures *in situ*, en passant par le choix des sites, les techniques d'échantillonnage et les mesures d'infiltration. Nous présenterons ensuite les mesures des paramètres physiques et hydrauliques : les protocoles suivis et les équations utilisées pour la détermination des propriétés physiques, courbes caractéristiques et paramètres pédologiques seront détaillés.

Dans la troisième partie, les résultats obtenus seront systématiquement passés en revue, et les premières observations seront formulées.

Enfin, dans la dernière partie, nous analyserons ces résultats en revenant sur les objectifs un à un. Nous synthétiserons alors les différentes conclusions tirées pour rencontrer notre objectif

premier, l'évaluation du comportement hydraulique des sols à partir de la classification pédologique.

Nous terminerons en étudiant les possibilités de prolongement de notre recherche et en formulant quelques recommandations à suivre dans ce cadre.

## Contexte général

### *La Guadeloupe en quelques lignes*

La Guadeloupe (16°15'N - 61°32'W pour la capitale, Pointe-à-Pitre) est un archipel situé sur l'arc des petites Antilles, entre l'océan Atlantique et la mer des Caraïbes. Elle est constituée de deux îles principales, la Grande-Terre et la Basse-Terre (le « papillon guadeloupéen »), séparées par un étroit bras de mer (la Rivière Salée). La Grande-Terre (590 km<sup>2</sup>, 150 m d'altitude) est plus petite et plus basse que la Basse - Terre (848 km<sup>2</sup>, 1467 m d'altitude). A ces deux îles s'ajoutent cinq dépendances : Marie-Galante, les Saintes, la Désirade, Saint-Martin et Saint-Barthélemy.

L'arc des petites Antilles est composé de deux arcs. L'arc externe, ancien, correspond aux îles calcaires. Quant à l'arc interne, il est issu du volcanisme récent. Une des particularités de la Guadeloupe est qu'elle se trouve à cheval sur ces deux arcs, la Grande-Terre faisant partie de l'arc ancien et la Basse-Terre de l'arc récent. Les deux îles sont donc très contrastées.

Notre site d'étude se trouve sur le versant est du volcan la Soufrière, point culminant de la Guadeloupe, au sud-est de la Basse-Terre, sur la commune de Capesterre-Belle-Eau.

### *Climat*

Le climat général de la Guadeloupe est de type tropical maritime. L'île est exposée aux alizées d'est et la température de l'eau est d'approximativement 27°C. Au cours de l'année, deux saisons sont plus ou moins bien marquées : une saison sèche, dite carême, de décembre à mai, et une saison humide, hivernage ou saison cyclonique, de juin à novembre.

Durant le carême, l'air est plus sec et la pluviométrie modérée. Durant l'hivernage, les températures sont plus élevées, de même que l'humidité et la pluviométrie.

### **Pluviométrie**

Les valeurs de pluviométrie sont très variables sur une faible distance. Il est nécessaire de bien comprendre les principes qui régissent la pluie afin d'appréhender la situation dans toute sa complexité. Deux effets se combinent au dessus de la Guadeloupe : la continentalité et l'orographie.

Lorsque les masses d'air océaniques chargées d'eau passent au-dessus de l'île, elles se réchauffent. Leur instabilité augmente et provoque la formation de nuages convectifs générateurs d'averses. Cet effet est responsable de l'accroissement de la pluviosité de l'est vers l'ouest.

Un deuxième effet, nettement plus important en Basse-Terre, est l'effet orographique. Le soulèvement des masses d'air à hauteur des montagnes provoque un refroidissement et une condensation de la vapeur d'eau, qui résulte en une forte augmentation de la pluie sur le versant est (versant au vent). Une fois les sommets passés, l'air redescend en se réchauffant et

la pluie diminue donc très rapidement sur le flanc ouest (versant sous le vent). Cet effet est plus connu sous le nom de « effet de foehn ».

Cet effet explique la présence d'un gradient pluviométrique avec l'altitude en Basse-Terre. Ce gradient est très marqué sur les deux versants de la Soufrière, et explique en partie la présence de la plupart des bananeraies sur le versant au vent.

Chaperon *et al* (1985, pp.485-486) ont ainsi établi une relation très claire entre altitude et précipitations. Les équations suivantes expriment cette relation de manière linéaire (Henriet, 2008, p 123) :

$$\text{Pente ouest (versant sous le vent)} : \quad p = 577 + 6.10 \cdot h \quad r^2 = 0.97$$

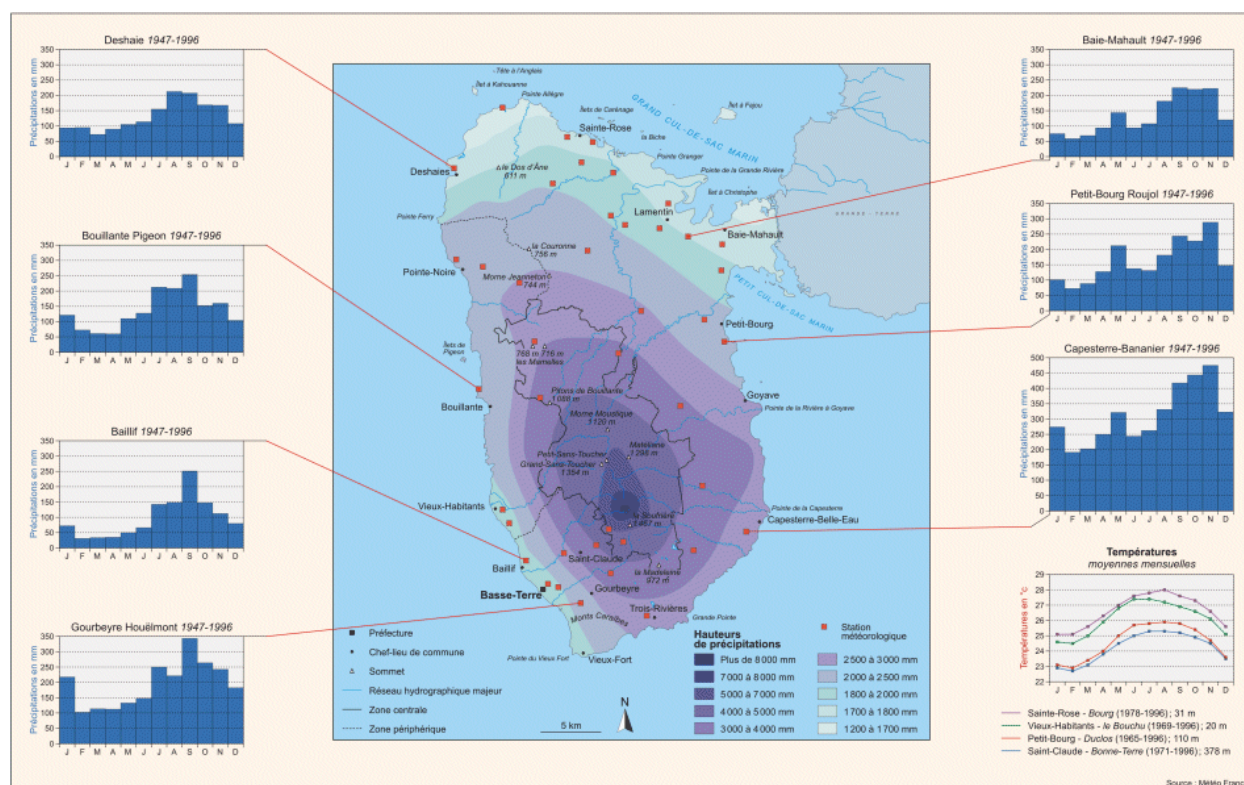
$$\text{Pente est (versant au vent)} : \quad p = 2368 + 5.65 \cdot h \quad r^2 = 0.94$$

Avec  $p$  = pluviométrie annuelle moyenne [mm] et  $h$  = altitude [m].

## Température

Les températures sont peu variables au cours de l'année. La différence entre carême et hivernage est en effet de l'ordre de 3°C.

Dans la zone de culture de la banane, les températures moyennes sont de l'ordre de 23°C au carême et de 26°C pendant l'hivernage.



**Figure 1 : Pluviométrie et températures (Atlas du parc national de Guadeloupe)**



## Sols

---

Au sud de la Basse-Terre, et en particulier sur le flanc est de la Soufrière, des variations importantes des caractéristiques des sols sur une courte distance sont observées (Colmet-Daage et Lagache, 1965). Ces variations sont à attribuer à la diversité des facteurs pédogénétiques : âge des matériaux parentaux, différences climatiques et différences topographiques. Parmi ceux-ci, le climat est le plus important, notamment à cause du fait que la nature pétrographique des produits éruptifs varie peu (Ndayiragije, 1996) et sont assez récents ( $10^3$ - $10^4$  ans) (Charlier, 2007).

En particulier, le gradient pluviométrique évoqué ci-dessus est responsable de l'apparition d'une séquence d'altération partant de la côte, avec des sols brun rouille à halloysite, et allant vers le sommet du volcan, avec des andosols perhydratés<sup>1</sup>. Le régime hydrique conditionne en effet l'altération des minéraux et donne lieu à des sols très différents (Chadwick *et al.*, 2003). La séquence étudiée prend, du sommet vers la côte, la forme suivante :

**Andosols perhydratés → Andosols → Sols bruns andiques  
→ Sols bruns rouille à halloysite**

Dans cette partie, nous détaillerons un à un ces différents sols en nous basant sur les travaux de Colmet-Daage et Lagache (1965), de Colmet-Daage et Gautheyrou (1972, 1973), de Ndayiragije (1996), de Dorel *et al.* (2000), de Dorel (2001), de Perpina (2001), de Pochet *et al.* (2007) et de Charlier (2007).

### Andosols

Ces sols sont issus du volcanisme jeune (dépôts datant du Pliocène et du Quaternaire) et se situent autour du massif de la Soufrière, où la pluviométrie varie entre 2500 et 5000 mm/an, voire plus. Le sol y est donc en permanence très proche de la saturation et aucune période de dessiccation n'est observée au cours de l'année.

Ces sols sont d'épaisseur variable et leur recouvrement est donc parfois discontinu. Ils sont essentiellement composés de substances allophaniques<sup>2</sup> et d'oxydes de fer et d'aluminium. Ces oxydes peuvent être cristallins (gibbsite) ou mal cristallisés (ferrihydrite). La présence de gibbsite indique un milieu très pauvre en silicium.

Ces sols ont en outre des teneurs en matière organique très élevées, de l'ordre de 10-15% en surface et de 2% en profondeur. Ces valeurs élevées s'expliquent par les interactions entre composés organiques et allophanes qui forment des associations très stables et rendent la matière organique difficilement minéralisable. Cette particularité leur confère des capacités d'échange cationique (CEC) très élevées.

Le taux de saturation en base (TSB) est par contre généralement assez faible. Cela s'explique par la forte pluviométrie à laquelle sont exposés ces sols ; le lessivage y est donc très important et le TSB peut descendre à des valeurs de l'ordre de 10%.

---

<sup>1</sup> La classification utilisée dans ce travail est la classification locale. Les correspondances dans les systèmes de classification couramment utilisés sont repris en annexe.

<sup>2</sup> Groupe de minéraux ayant la taille des argiles avec une « organisation cristalline à courte distance et contenant de la silice, de l'alumine et de l'eau en combinaison chimique » (Parfitt, 1990, cité par Ndayiragije, 1996).

Enfin, la densité apparente de ces sols est très faible (de l'ordre de  $0.5 \text{ g/cm}^3$ ) et leur humidité pondérale très élevée (« sols - éponges »), pouvant aller jusqu'à 200%.

### **Sols bruns andiques**

Ces sols sont en fait un état de transition entre les deux extrêmes que sont les andosols et les sols brun rouille à halloysite. Ils se trouvent donc à une altitude intermédiaire, entre 100 et 200 m. A cette altitude, de brefs épisodes sans pluie provoquent une dessiccation temporaire de la surface, ce qui favorise la formation d'halloysite, sans influencer l'humidité en profondeur.

Leur densité apparente est donc plus élevée que celle des andosols, en particulier en surface (de l'ordre de  $1 \text{ g/cm}^3$ ), la teneur en C plus faible (quelques pourcents en surface), la teneur en argile plus élevée.

### **Sols brun rouille à halloysite**

Situés à une altitude proche du niveau de la mer, ces sols sont sujets à des périodes de dessiccation régulières au cours de la saison sèche, ce qui favorise la formation d'halloysite. Celle-ci est une argile cristalline de type phyllosilicate 1:1 formée par altération des verres volcaniques. Elle est caractérisée par une structure tubulaire de quelques dizaines de nanomètres de diamètre et de plusieurs micromètres de long (West *et al*, 2004).

Les teneurs en argile sont très élevées (de l'ordre de 80%), mais les valeurs de CEC sont relativement faibles, les minéraux 1:1 étant largement dominants. Leur taux de saturation en base est par contre beaucoup plus important (60-70%) en raison de la plus faible pluviométrie.

Enfin, en raison de la moindre teneur en allophane, la matière organique est plus exposée à la minéralisation et les valeurs observées sont plus faibles (1-2% en surface).

Une caractéristique très importante est due à la présence importante d'oxydes de fer et d'aluminium cristallins. Ces particules, chargées négativement, interagissent avec les particules d'argiles, cationiques, et forment des agrégats très cohérents. Cette structure particulière est connue sous le nom de pseudo-sables. D'un point de vue hydrodynamique, en effet, ces sols se comportent comme des sols argileux à forte succion mais comme des sables à faible succion. Cet effet est donc une des clefs permettant d'expliquer le comportement hydrodynamique particulier de ces sols et, à ce titre, nous intéresse au plus haut point.

### **Tendances générales de la séquence**

Quelques tendances sont observables le long de la séquence. Nous ferons ici rapidement le point sur celles-ci afin de bien comprendre la dynamique d'altération dans sa globalité.

Du sommet du volcan à la côte, on observe une diminution quasi linéaire des précipitations. Cela implique que les périodes de dessiccation des sols, inexistantes en altitude, se font de plus en plus fréquentes au fur et à mesure que l'on s'approche de la côte. Cet élément est la clef qui permet d'expliquer les variations importantes des caractéristiques pédologiques le long de ce transect de 10 km.

Une forte pluviométrie favorise l'accumulation de grandes quantités de matière organique (Van Wambeke, 2002 ; Chadwick *et al*, 2003). Ces deux auteurs soulignent également le fait que teneurs en constituants organiques et allophaniques sont liées, ces deux composants s'agréant et se stabilisant mutuellement. Un environnement à forte pluviométrie entraîne ainsi une stabilisation des allophanes et un ralentissement de leur transformation en halloysite. Il est toutefois difficile de discerner la cause et la conséquence de cet effet. Chadwick *et al* (2003) présentent ainsi les fortes teneurs en matière organique comme étant « à la fois la cause et la conséquence des réactions stabilisantes qui lient les composés carbonés avec les allophanes ». La séquence est donc caractérisée par une augmentation de la teneur en matière organique et en allophane proportionnelle à celle de la pluviométrie.

De plus, l'altération des allophanes, favorisée par une alternance entre conditions sèches et humides, conduit à la formation d'halloysite (Van Wambeke, 2002 ; Chadwick *et al*, 2003). Un gradient de teneurs en halloysite inverse à la teneur en allophane est donc observé le long de la séquence (Ndayiragije, 1996).

La densité apparente, corrélée à la teneur en argile, diminue quant à elle avec l'altitude.

Ce transect présente donc des tendances pédologiques très claires, fortement liées aux caractères climatiques et topographiques. Un des objectifs de cette étude est donc d'identifier des tendances hydrodynamiques corrélées à cette séquence.

## ***La culture de la banane***

---

La banane est le premier produit d'exportation en volume de la Guadeloupe. Plus de 80% de la production annuelle de l'île est exportée chaque année (La Guadeloupe en chiffre). A ce titre, elle est un des piliers de l'économie locale. Il est donc opportun de s'intéresser à cette culture et, dans le cadre de notre travail, il est important de faire le point sur les techniques et systèmes de culture appliqués.

Les bananes destinées à l'exportation sont essentiellement le fait de deux types d'entreprises. Le premier, dit entrepreneurial, est un système dans lequel les terres appartiennent à un grand propriétaire dont les activités sont multiples. L'exploitation des bananeraies est alors laissée à un gérant, qui jouit généralement d'une grande liberté d'action. Le second type reprend des exploitants qui sont propriétaires et gèrent eux-mêmes leur exploitation, qui est souvent spécialisée dans la culture de bananes, avec l'aide d'un certain nombre d'ouvriers.

Dans les deux cas, l'agriculture pratiquée est très spécialisée, ce qui implique une maîtrise de plus en plus grande des processus, avec une utilisation croissante d'intrants, travail du sol lorsque la topographie le permet, contrôle phytosanitaire, etc.

La banane destinée à l'exportation est cultivée en monoculture. Un nombre restreint de variétés est utilisé sur l'île, et il s'agit essentiellement de variétés triploïdes *acuminata* du sous-groupe Cavendish. La production de matériel végétal est réalisée *in vitro* et les jeunes plants sont mis en terre à la main. Il n'y a donc pas de semis.

Ce type de monoculture, couplé à l'utilisation d'un nombre très restreint de variétés, entraîne le développement d'un parasitisme spécifique qui requiert l'utilisation de nombreux produits phytosanitaires (lutte chimique). En particulier, la lutte contre le charançon et d'autres pathogènes telluriques utilise des molécules organophosphorées, qui ont remplacé les éléments organochlorés après leur interdiction en 1993. De même, des formulations fongicides huileuses (pour éviter un lessivage trop rapide dû aux fortes précipitations),

appliquées par voie aérienne, sont utilisées pour lutter contre la cercosporiose, maladie fongique qui provoque des nécroses sur le feuillage et conduit à terme au dépérissement de la plante.

La banane est plantée pour une durée de 4-5 ans, en alternance avec une période de jachère d'environ un an qui a pour but de diminuer la pression parasitaire. Chaque pied de bananier donnant un seul régime, celui-ci est coupé après récolte et un rejet est alors sélectionné et se développe pour donner le pied suivant. Le cycle de production (délai entre deux récoltes de régime pour une même plante) varie de 8 à 12 mois en fonction de l'altitude.

Lorsque la topographie le permet, le sol est généralement travaillé mécaniquement, parfois très en profondeur. Cette pratique est très dommageable en termes d'érosion et de conservation du sol, étant donné la forte pluviométrie et le relief accidenté. C'est pourquoi divers organismes tentent actuellement de populariser les pratiques agricoles sans travail du sol.

La banane est une culture demandeuse d'une grande quantité d'eau et très sensible au stress hydrique. Les parcelles situées à basse altitude, c'est-à-dire en conditions plus sèches, sont généralement irriguées. Les techniques d'irrigation utilisées sont multiples mais les plus courantes sont le « goutte à goutte » et le « sprinkler ».

Notons enfin que l'entretien des parcelles et des plantations s'effectue principalement de manière manuelle. Ceci s'explique aisément par la physionomie du bananier. L'exploitation de bananes est donc génératrice d'une grande demande de main-d'œuvre et joue donc un rôle socio-économique incontestable.

## ***Pollution***

---

Nous allons ici détailler le contexte particulier dans lequel s'inscrit notre étude. Celle-ci représente en effet un apport à la mise en place de solutions face à une situation problématique concrète identifiée.

Pour bien comprendre les objectifs et enjeux de ce travail, il est donc nécessaire de connaître l'origine du problème et les différentes réponses envisagées par les communautés scientifique et politique.

### **Eau, pluviométrie, agriculture : base du problème**

Comme sur nombre de petites îles, les ressources en eau douce sont limitées en Guadeloupe. Les seuls cours d'eau permanents se trouvent sur l'île de la Basse-Terre et leur exploitation est très importante : 84.6% de l'eau totale utilisée en Guadeloupe est en effet prélevée en rivière, de même que 71.5% de l'eau de distribution (Bonan et Prime, 2001, p14). La qualité de cette eau est donc primordiale.

L'agriculture du sud-est de la Basse-Terre est principalement consacrée à la culture bananière, comme le montre la carte ci-dessous. Nous avons vu plus haut qu'il s'agit d'une agriculture intensive avec une forte utilisation de pesticides. Cette affirmation était plus vraie encore au cours des années 1970-1980, période durant laquelle certains pesticides très rémanents dans les sols furent utilisés, en particulier un organochloré du nom de « chlordécone » pour lutter

contre le charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*). Cet insecticide persiste dans les sols pendant plusieurs dizaines d'années, voire plus (Gaumand *et al.* 2005).

Enfin, la pluviométrie est très élevée dans cette zone, allant de 2500 à 5000 mm d'eau par an. Ces précipitations sont pour une grande partie infiltrée dans les sols.

Lorsque les sols ont été cultivés pour produire de la banane durant les années 1970-1980, ils contiennent une grande quantité de pesticides. Ceux-ci, bien que fortement adsorbés, sont en petite partie entraînés par les eaux d'infiltration et se retrouvent dans les nappes et dans les cours d'eau. Bien que la quantité de pesticides ainsi transférés soit faible, le problème est majeur, étant donné la faible taille des réservoirs d'eau. Dès le début des années 2000, une pollution importante des nappes et cours d'eau du sud de la Basse-Terre a été diagnostiquée et une réponse rapide et efficace s'est avérée nécessaire (Bonan et Prime, 2001).

## **Gestion et prévention : une réponse en deux volets**

La réponse à ce problème s'articula peu à peu en deux volets : le premier consistait en l'évaluation et la gestion des risques liés à la pollution constatée des eaux de consommation, le second était consacré à la prévention de toute nouvelle pollution d'origine phytosanitaire pour le futur.

La première mesure prise fut ainsi la fermeture provisoire des captages contaminés et l'installation de systèmes de filtration (filtres à charbon actif) avant leur réouverture. Cette mesure s'est avérée très efficace et a permis de reprendre l'exploitation de l'eau pour tous les usages.

Des périmètres de protection autour de chaque captage ont ensuite été définis afin de prévenir tout risque de pollution supplémentaire causé par l'usage actuel et futur de pesticides. Mais les mesures à prendre au sein de ces périmètres étaient sujettes à discussion, en particulier à cause de la présence de cultures de bananes au sein de ces périmètres et de l'impact économique considérable qu'aurait une éventuelle interdiction de l'utilisation d'engrais et pesticides dans ces zones. La situation n'était donc toujours pas complètement stabilisée en 2005 (Gaumand *et al.*, 2005).

Ensuite, la récolte des pesticides polluants encore en circulation et des déchets ayant été en contact avec ces pesticides était nécessaire. Cela fut réalisé au cours de l'année 2002 et les résultats de cette campagne furent qualifiés de « satisfaisants » (Gaumand *et al.*, 2005).

Enfin, une réflexion sur les pratiques agricoles fut menée et déboucha sur un certain nombre de mesures (mesures agro-environnementales, nouvelles réglementations, etc.) dont l'application est très variable, couplées à des mesures de sensibilisation et de formation pour les acteurs locaux.

## **Situation actuelle**

Actuellement, les sites de traitement sur charbon actif sont toujours en activité. Les pesticides organochlorés ont été remplacés par des organophosphorés, et les politiques agricoles se mettent en place. La lutte contre la cercosporiose sera ainsi reconsidérée. Dans ce cadre, des recherches sont actuellement en cours au sein de différents organismes, tel le CIRAD, afin de développer de nouvelles variétés de bananes naturellement résistantes à cette maladie.

D'autres recherches ont également lieu afin d'optimiser les pratiques culturales dans une perspective de minimisation des pollutions résultantes.

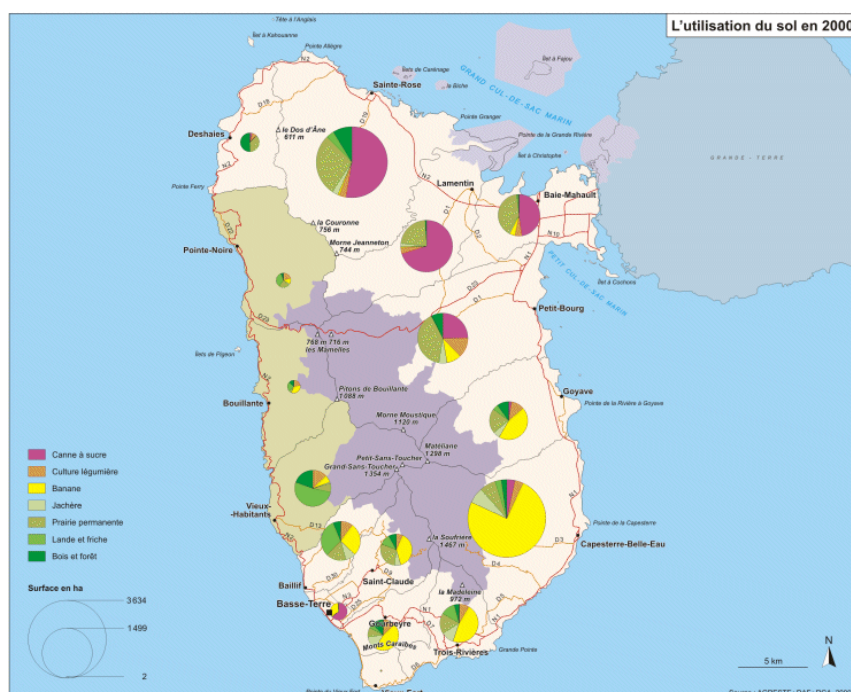
Enfin, un troisième volet est consacré à la compréhension des mécanismes de transfert d'eau et de pesticides de la surface vers les différents réservoirs naturels (nappes, rivières, etc.). Une thèse a ainsi été réalisée afin de modéliser le fonctionnement hydrique complet d'un petit bassin versant cultivé (Charlier, 2007) et l'objectif est maintenant d'étendre cette étude à des bassins versants beaucoup plus étendus.

Pour ce faire, il est nécessaire de connaître le comportement hydrodynamique des sols concernés. En effet, le ratio eau infiltrée – eau ruisselée en est directement dépendant, et ce ratio est primordial pour évaluer les mouvements d'eau et leur répartition au sein de différents réservoirs. Toutefois, comme nous l'avons déjà expliqué, la variabilité des sols est très grande dans cette zone et leur comportement hydrodynamique est donc très irrégulier.

Les mesures à effectuer pour déterminer les paramètres requis sont lourdes, et il n'est donc pas envisageable d'effectuer une campagne de terrain pour les déterminer sur l'ensemble de la région bananière.

Les caractéristiques pédologiques de ces sols sont par contre très bien connues et précisément cartographiées. Il est donc apparu qu'il serait utile de pouvoir extrapoler les paramètres hydrodynamiques à partir de celles-ci de manière précise dans cette région. En établissant un modèle suffisamment sensible et précis, il serait en effet possible de transformer les cartes pédologiques en cartes hydrodynamiques, ce qui serait d'une grande utilité dans le cadre des recherches actuelles.

C'est donc ici qu'intervient notre étude. Elle répond à un besoin exprimé de la communauté scientifique et s'inscrit dans le cadre de la problématique décrite ci-dessus.



**Figure 2 :** Utilisation du sol sur l'île de la Basse-Terre (Atlas du parc national de Guadeloupe)

## Etat de la recherche

Nous allons maintenant passer en revue les différents concepts qui seront utilisés dans la suite de ce mémoire. Nous commencerons par un rappel concernant l'infiltration et les différentes équations qui seront utilisées. Nous reviendrons ensuite plus en détail sur la structure particulière de certains sols traités. Nous donnerons quelques explications sur le concept d'hydropédologie, et nous terminerons par examiner les paramètres pédologiques auxquels nous nous intéresserons plus loin.

Cette partie nous permettra ainsi de rappeler les bases nécessaires à la compréhension de notre étude.

## Hydropédologie

### Idée de base

L'hydropédologie est une discipline émergente dans le cadre de laquelle s'inscrit notre travail. Elle combine les apports de la pédologie, de la physique du sol et de l'hydrologie pour une approche globale et intégrée des processus hydrodynamiques qui ont lieu dans les sols, et ce à différentes échelles. Dans son article, Lin *et al* (2005) font le point sur les avancées actuelles de cette matière. Nous récapitulerons ici les principales tendances, et expliquerons par la suite l'intérêt de cette approche pour notre étude.

L'idée de base qui mène à cette discipline est assez simple : les interactions entre le sol et l'eau sont à la fois complexes et étroites. Il est donc logique et cohérent d'étudier ces deux domaines comme un système à part entière dans une dynamique spatio-temporelle.

L'intégration de l'approche pédologique, axée sur les sols, de l'approche hydrologique, basée sur l'eau, et de la physique du sol, dont un des principaux intérêts est le mouvement de l'eau dans le sol, découle donc de cette idée de base.

Les volets descriptif et appliqué de la pédologie sont une de ses grandes forces, de même que son souci de cartographie du sol. Les questions d'échelles sont en effet un des grands défis de l'hydropédologie, la physique du sol travaillant essentiellement à l'échelle du VRE, et l'hydrologie travaillant à des échelles beaucoup plus grande. La pédologie est donc toute indiquée pour faire le lien entre ces deux domaines.

La physique du sol modélise depuis un certain temps nombre de processus de mouvement et de transfert dans les sols. Ces modèles sont précieux, mais sont généralement limités dans le temps et dans l'espace, bien que la tendance actuelle soit à l'élargissement des zones d'études. L'interaction avec la pédologie peut donc être envisagée pour au moins trois aspects différents : l'approche quantitative des paramètres structuraux, la prise en considération de l'aménagement des sols (*landscape features*), propre à la pédologie, dans les modèles à grande échelles (ceci est valable également pour l'hydrologie) et enfin l'affinage des données entrées dans les modèles et les transferts d'échelles.

L'hydrologie, enfin, très au point dans la modélisation des cycles de l'eau, peut être complétée par la physique du sol pour parvenir à intégrer la distribution physique des propriétés hydrauliques dans ces modèles. De même, la pédologie peut aider à comprendre la

variabilité des sols *in situ* et à intégrer les composantes environnementales (*landscape features*).

De manière générale, l'approche hydropédologique, malgré son apparition récente, est au centre de nombreux intérêts et son efficacité a déjà été constatée à maintes reprises. Une de ses principales forces se trouve dans l'intégration des résultats à différentes échelles, ce qui est précisément l'objectif que nous recherchons à terme. Cette méthodologie est donc ici tout à fait appropriée.

## Applications intéressantes pour notre étude

La pertinence de l'intégration de ces trois disciplines étant maintenant présentée, attardons-nous quelques instants sur des considérations hydropédologiques utiles à notre travail.

Bouma (1992, cité par Lin *et al*, 2005) suggère un protocole en trois étapes pour calculer des paramètres hydrauliques à partir de données physiques et morphologiques. Tout d'abord, mesurer les propriétés hydrauliques en prenant les attributs morphologiques du sol en compte (horizons, structure décrite *in situ*, etc.). Deuxièmement, exprimer sous la forme des coefficients de l'équation de van Genuchten<sup>3</sup> les propriétés hydrauliques mesurées.<sup>4</sup> Et enfin, lier ces coefficients à des mesures du sol facilement disponibles (texture, densité apparente, matière organique, etc.) ou à des groupements plus qualitatifs d'horizons.

Il est donc possible de déterminer les paramètres hydrauliques des sols à partir de données micro et macromorphométriques (Bouma *et al*, 1979 ; Lin *et al*, 1999 ; Vervoort et Cattle (2003) ; Kutílek, 2004 ; cités par Lin *et al*, 2005). Toutefois, l'importance de certains facteurs non pris en compte dans notre étude, telle la densité racinaire, est signalée.

Lin *et al* (1999a) soulignent ainsi l'importance de cinq paramètres (texture, teneur en eau initiale, pédalite, macroporosité et densité racinaire) à partir desquels il est possible de prédire le comportement hydrodynamique d'un sol. Le problème de la quantification de ces valeurs est alors posé. Cette étape est nécessaire pour pouvoir utiliser ces données dans des modèles quantitatifs.

Une méthode est suggérée, et un système de transposition en valeurs numériques est mis au point. Ce système est basé sur une division des différents paramètres en un certain nombre de classes, à laquelle correspond une valeur numérique.

Cette méthode n'est toutefois pas appropriée dans le cadre de notre étude. La technique proposée se prête bien à des sols sensiblement différents, mais pas à une analyse plus fine telle que celle effectuée ici, avec des sols similaires, voire de la même classe. Il nous est donc nécessaire de fonctionner avec des paramètres quantifiables avec précision, et ce malgré l'impact non négligeable d'autres paramètres rapportés par ces auteurs. Il sera donc judicieux d'être très attentif lors du choix de nos sites de mesure afin de minimiser l'effet de tels facteurs.

Enfin, Lin *et al* (1999b) mettent en évidence l'importance de l'agrégation sur la macroporosité des sols argileux, et donc sur leur comportement hydrodynamique proche de la saturation. Les valeurs d'infiltration de certains sols argileux sont en effet nettement

---

<sup>3</sup> Cette équation est présentée en détail dans la partie « matériel et méthode », à la section « Courbes  $\theta$ -h ».

<sup>4</sup> Dans le cadre de notre travail, cette méthode fut suivie dans ses grandes lignes mais, pour des questions de facilité, l'équation de Gardner fut utilisée pour modéliser la courbe de conductivité (pour plus de détails, se référer à la partie « matériel et méthode », section « infiltromètre à suction »).



supérieures à celles observées pour des sols sableux. Cet effet est attribué à la moins bonne distribution des particules de petite taille, ce qui favorise les « bypass flow »<sup>5</sup> (Lin *et al*, 1999b).

Dans le cas de sols tropicaux, cette mauvaise distribution peut être attribuée à l'agrégation des particules argileuses (Uehara et Gillman, 1981). Cet effet étant en partie responsable de la macroporosité, qui est elle-même déterminante pour la conductivité hydraulique à saturation, il nous sera nécessaire de nous focaliser sur les éléments responsables de cette agrégation. Le point suivant est consacré à cet aspect.

Plusieurs études ont démontré qu'il était possible d'estimer divers paramètres hydrodynamiques d'un sol à partir de caractéristiques diverses. Parmi ces caractéristiques, certaines sont purement pédologiques et liées au type de sol. Les paramètres influençant l'agrégation sont particulièrement intéressants. D'autres caractéristiques sont par contre plus générales, et ne seront pas prises en compte dans notre étude. Il est dès lors nécessaire de minimiser l'impact de ces facteurs, ce qui implique une attention particulière lors du choix des sites d'étude.

## Sols

### Structure particulière et infiltration

Comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, certains des sols traités développent des structures particulières, appelées pseudo-sables, ce qui entraîne un comportement hydrodynamique inattendu, compte tenu de la composition granulométrique de ces sols. Dans cette partie, nous reviendrons plus en détail sur cet effet qui nous intéresse au plus haut point.

Tous les sols de la séquence ont des teneurs en argile granulométrique très élevées (Dorel *et al*, 2000). Cette observation nous amène à penser que les conductivités de ces sols devraient être très faibles, les matériaux argileux étant caractérisés par une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$ , et étant souvent considérés comme imperméables. Les mesures de conductivité effectuées sur ces mêmes sols montrent cependant des valeurs parfois très importantes, allant jusqu'à 900 mm/h, et une augmentation de la conductivité à saturation avec la teneur en argile (Dorel *et al*, 2000).

**Tableau 1 :** Granulométrie et infiltration des sols de la séquence (horizon A) (Dorel *et al*, 2000)

Type de sol	Argile [%]	Limon [%]	Sable [%]	Conductivité à saturation [mm.h <sup>-1</sup> ]
AP	54	28	19	Non donné
AN	62	32	6	350 – 35
BA	62	27	11	Non donné
BR	80	14	6	900 – 150

<sup>5</sup> Flux préférentiels : phénomène de transport de l'eau et des solutés par des voies privilégiées à une vitesse accélérée à travers une fraction du milieu poreux.

La présence importante d'oxydes de fer aux cotés des argiles, en particulier dans les sols à halloysite (phyllosilicates 1:1) permet d'expliquer cela. En effet, les oxydes sont chargés positivement tandis que les argiles cristallines le sont négativement au pH du sol. Ces deux minéraux s'associent logiquement pour former des agrégats très cohérents, de l'ordre du millimètre.

West *et al* (2004) insistent sur la nature de l'halloysite et son interaction particulière avec la ferrihydrite. La structure tubulaire de ce minéral argileux lui confère naturellement une porosité importante, et l'affinité de la ferrihydrite pour ses particules est importante. Il résulte de cette agrégation la formation d'un sol à structure sableuse et à texture argileuse (Uehara et Gillman, 1981).

Cela se traduit par un comportement hydrodynamique très particulier : à forte succion, l'eau microporale est contenue entre les argiles, au sein des micro-agrégats ; le sol se comporte comme un sol argileux. A faible succion, par contre, l'eau macroporale se trouve entre les agrégats et le sol présente un comportement de type sableux.

Outre la présence d'oxydes de fer et de phyllosilicates 1:1, d'autres éléments favorisent la formation de cette structure en pseudo-sable. Dorel *et al* (2000) soulignent ainsi l'importance de la matière organique dans la formation des macropores. Cette affirmation est toutefois remise en cause par Pochet *et al* (2007), qui mettent par contre en lumière le rôle de la ferrihydrite. Ce rôle particulier est également détaillé dans West *et al* (2004).

L'effet combiné de la forte charge des minéraux argileux et de la grande surface spécifique de la ferrihydrite serait la clef de cette agrégation et donc des fortes valeurs de conductivité à faible succion des sols à halloysite. L'effet de la matière organique reste quant à lui à démontrer.

## **Eléments de pédologie**

Comme nous l'avons déjà expliqué, un certain nombre de paramètres pédologiques seront établis. Parmi ceux-ci, quelques-uns revêtent une importance particulière pour notre travail. Nous rappellerons ici très brièvement leur importance et la raison de leur choix. Ces paramètres sont les suivants : teneur en matière organique, en allophane et en ferrihydrite. D'autres paramètres seront également déterminés mais ne seront pas directement utilisés ; nous ne les détaillerons donc pas ici. Il s'agit du pH, de la CEC, de l'acidité échangeable, des teneurs en cations échangeables et des teneurs en Fe, Al et Si (utilisées indirectement pour la détermination de la teneur en allophane). Nous terminerons par une brève présentation de l'halloysite, minéral argileux rencontré dans certains des sols traités.

## **Matière organique**

La matière organique (MO), dont Bouma (1992) et Dorel (2000) soulignent l'importance pour l'estimation du comportement hydrodynamique, est caractérisée par un point isoélectrique (PZNC, point of zero net charge) bas. Il se situe aux environs de pH 2.5. Cela signifie qu'à un pH supérieur, généralement rencontré dans les sols, les groupements carboxyles situés à la surface de la MO sont principalement sous forme déprotonée ( $-\text{COO}^-$ ). La MO peut donc être considérée comme négative dans les sols, du moins à pH supérieur à pH 2.5.

Cette caractéristique confère à la MO une capacité d'échange cationique (CEC) importante et en fait un élément fertilisant reconnu. Ce caractère est encore accentué par ses qualités structurantes.

Dans le cadre de notre travail, ces propriétés structurantes nous intéressent particulièrement. Dorel *et al* (2000) ont ainsi établi un modèle linéaire qui, à faible teneur en eau, permet de prédire précisément la macroporosité à partir des seules teneurs en allophane et en matière organique ( $r^2=0.9$ ). Il signale également que Ito *et al* (1991) observent une relation similaire. Les allophanes étant positifs au pH du sol, comme nous le verrons plus tard, il est raisonnable de supposer que les propriétés surfaciques de charge de la MO jouent un rôle important dans cet effet.

## **Allophane**

Comme nous venons de le signaler, les allophanes joueraient également un rôle important sur la macroporosité du sol (Dorel *et al*, 2000). Ceci est confirmé par plusieurs auteurs, qui soulignent des effets d'agrégation entre MO et allophane (van Wambeke, 2002 ; Chadwick *et al*, 2003).

Les allophanes sont des « minéraux ayant la taille des argiles avec une organisation cristalline à courte distance, et contenant de la silice, alumine et de l'eau en combinaison chimique » (Ndayiragije, 1996). Ce sont des produits dérivés de l'altération de verres volcaniques. Leur structure moléculaire consiste en couches de phyllosilicates 1:1 incomplets qui contiennent de l'Al dans les positions octaédrique et tétraédrique (van Wambeke, 2002).

Leur surface spécifique est particulièrement importante (700 – 1000 m<sup>2</sup>/g), et des groupements  $\text{AlOH}_2^+$  y sont présents, en quantité variable selon le type d'allophane (van Wambeke, 2002). Il est dès lors prévisible d'observer des effets d'agrégation avec des particules à surface négative, telle que la MO.

## **Ferrihydrite**

La ferrihydrite est un oxyde de fer fréquemment rencontré dans les sols. Il est particulièrement réactif, entre autre à cause de sa très grande surface spécifique (Ndayiragije, 1996 ; West *et al*, 2004). Son point isoélectrique se situe entre pH 7 et 9, et il est donc chargé positivement dans la plupart des sols. Il se présente sous une forme sphérique, de taille très réduite.

De nombreux auteurs ont souligné son importance en tant qu'agent de liaison avec des particules chargées négativement, et en particulier les minéraux argileux (Dorel, 2000 ; West *et al*, 2004 ; Pochet *et al*, 2007). L'affinité particulière de ces oxydes avec l'halloysite est mise en évidence par West *et al* (2004), et la structure qui résulte de cette agrégation nous intéresse particulièrement.

## Halloysite

L'halloysite est un minéral argileux 1:1, produit de l'altération des allophanes. Sa formation est favorisée par un régime hydrique irrégulier (West *et al*, 2004). Lorsque la pluviométrie est trop intense, les allophanes, stabilisés par les particules de MO, ne se dégradent que très lentement et aucune accumulation d'halloysite n'est observée (van Wambeke, 2002, Chadwick *et al*, 2003). Si la pluviométrie baisse encore et que l'altération s'accélère, les teneurs en kaolinite augmentent aux dépens de l'halloysite (Delvaux *et al*, 1992).

Ce minéral est très important pour le comportement hydrique du sol tant par son effet agrégeant au contact de la ferrihydrite que par la forme particulière de ses particules (West *et al*, 2004).

Elle prend en effet la forme de tubes de quelques dizaines de nanomètres de diamètre et de plusieurs micromètres de long (Delvaux *et al*, 1992 ; West *et al*, 2004). Cette forme confère à ce matériau une porosité relativement importante. Sa forme tubulaire implique en effet une résistance à la compaction plus importante et une porosité supérieure à celles observées, par exemple, pour la kaolinite, dont les agrégats sont plats et angulaires (West *et al*, 2004).

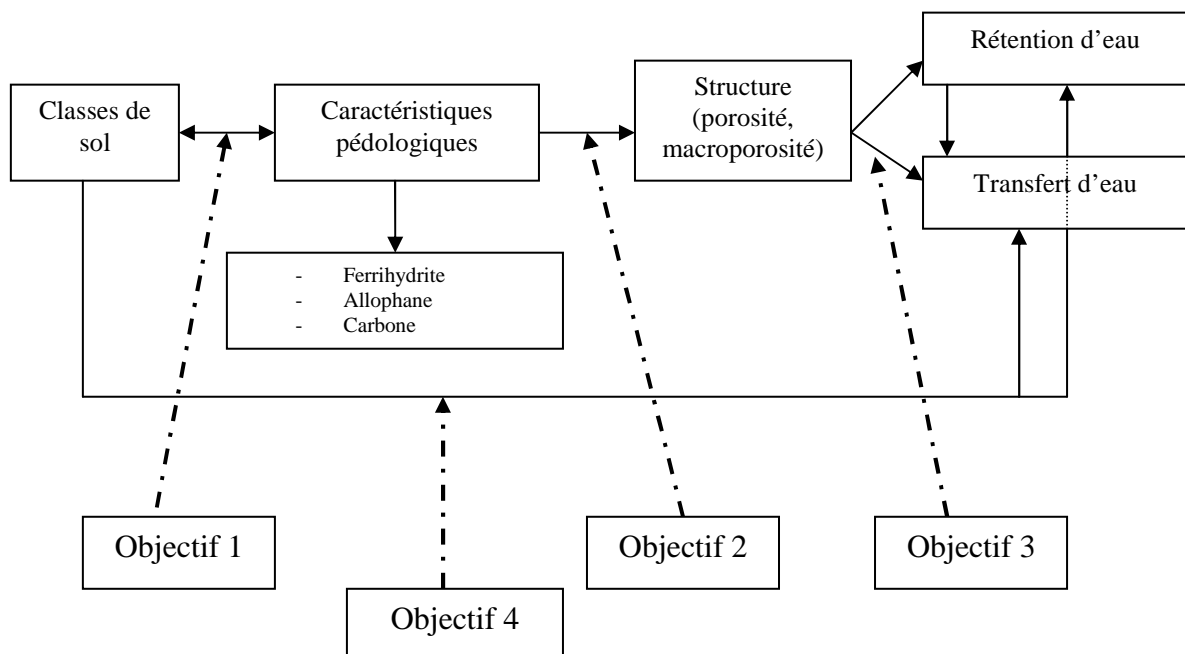
La quantité d'halloysite présente dans les sols est donc un paramètre qu'il serait intéressant de quantifier pour notre recherche. Malheureusement, cette détermination n'est pas routinière et ces mesures ne seront donc pas effectuées dans le cadre de ce travail.

## Hypothèses et Objectifs

L'objectif final de cette étude est de démontrer les corrélations entre les comportements hydrostatique et hydrodynamique des sols d'une topo-séquence et leurs caractéristiques pédologiques.

Afin d'atteindre ces objectifs, différentes étapes doivent être franchies (figure 2).

1. La première étape est de vérifier que les paramètres pédologiques sont bien discriminants par rapport aux types de sol et, inversement, de vérifier que les classes de sol sont bien caractérisées par des différences de valeur pour ces paramètres. Il s'agit également d'analyser cette relation de manière qualitative.
2. Dorel *et al* (2000) établissent un lien entre paramètres pédologiques et porosité. Le deuxième objectif consiste à vérifier cette relation en élargissant la zone d'étude et, ici aussi, d'évaluer la participation des différentes caractéristiques pédologiques.
3. La porosité, et en particulier la macroporosité, est déterminante sur les comportements hydrodynamique et hydrostatique des sols. Le troisième objectif est de vérifier cette hypothèse en établissant une corrélation entre ces deux aspects.
4. Enfin, une fois ces trois étapes effectuées, une dernière analyse devrait permettre de les synthétiser et ainsi de prédire de manière qualitative les comportements hydrauliques de nos sols sur base de la classification pédologique.



**Figure 3 :** Présentation de l'approche et des objectifs de l'étude

## Matériel et méthode

Dans cette deuxième partie, nous détaillerons les différentes techniques utilisées et méthodologies employées au cours de nos campagnes de prises de mesures, que ce soit *in situ* ou en laboratoire.

### Expériences in situ

#### Choix des sites

Cinq sites par type de sol ont été choisis. Il y a donc cinq sols brun rouille à halloysite, cinq bruns andiques et cinq andosols, dont trois andosols et deux andosols perhydratés. Pour chacun de ces sites, toutes les mesures ont été réalisées pour l'horizon A et pour l'horizon B. A ces quinze sites viennent s'ajouter dix sites sur andosols perhydratés caractérisés uniquement en horizon A. Il s'agit de sites se trouvant sur un bassin versant d'altitude (Fefe) préalablement caractérisé et pour lequel un grand nombre de mesures étaient déjà disponibles (Cavasino, 2005 ; Charlier, 2007).

Au sein de chaque type de sol, nous avons essayé d'avoir une grande dispersion spatiale.

La localisation précise des sites a été déterminée en trois temps. Tout d'abord, une présélection sur carte en croisant la carte pédologique détaillée de la zone d'étude et une carte d'occupation du sol par parcelle de cette même zone à l'aide du logiciel ArcGis. La vérification s'est ensuite opérée sur le terrain, en fonction d'un certain nombre de critères. Enfin, la sélection finale a été effectuée après avoir, ou non, obtenu l'accord des propriétaires de travailler sur leurs plantations.

La sélection a été effectuée au regard de plusieurs critères, que nous présentons ici.

- Un critère topographique : l'influence de la topographie, et en particulier des zones de fortes pentes et des « bas de morne<sup>6</sup> » sur le comportement des sols (Cavasino, 2005, p.56) ayant été mis en évidence, toutes les parcelles sélectionnées sont des parcelles plates (pente <5%).
- L'âge des parcelles : le travail du sol ayant lui-aussi un impact fort (Dorel *et al*, 2000), des bananeraies pérennes auraient été appropriées. Toutefois, ce type de culture étant de plus en plus rare, il s'est avéré impossible de s'en contenter. Nous avons alors sélectionné des sites anciennement plantés (quatrième ou cinquième cycle de culture) afin de supprimer un effet éventuel du travail récent du sol.
- La diversité des propriétaires : afin de limiter l'impact éventuel d'une pratique agricole particulière, nous avons essayé de varier dans la mesure du possible l'identité du planteur responsable de l'exploitation du terrain. Priorité a donc été donnée à des parcelles appartenant à des planteurs différents.

---

<sup>6</sup> Pied de colline.

Il n'a toutefois pas toujours été possible de rencontrer ces trois critères en même temps. Priorité a alors été donnée aux deux premiers, ce qui explique que nous retrouverons quelques fois plusieurs parcelles étant exploitée par le même gérant.

La disposition précise des sites est présentée sur carte en annexe, de même que leurs coordonnées précises, déterminées à l'aide d'un GPS.

Au sein des parcelles, les mesures ont toujours été prises à proximité du chemin d'accès, et ce pour des questions pratiques. Afin de garantir des conditions constantes, elles ont été effectuées dans les inter-rangs, c'est-à-dire entre deux lignes de bananiers. De plus, lorsque la parcelle est exploitée en inter-rangs multiples, il s'agit de l'inter-rang sur lequel sont disposés les déchets de feuilles et de troncs, et ce afin de standardiser les conditions de mesures.

## Echantillonnage

Deux types d'échantillons ont été prélevés pour chaque site : des échantillons perturbés et des échantillons non perturbés. Le sol perturbé sera utilisé pour les analyses pédologiques, tandis que le sol non perturbé le sera pour les analyses hydrodynamiques et pour la détermination des propriétés physiques.

Pour les analyses pédologiques, le sol est prélevé à la pelle et placé dans un sachet, à raison d'un échantillon par horizon. La quantité prélevée varie entre 500 g et 1 kg. Le sol est ensuite étalé durant une période allant de 16 à 24 heures dans une pièce aérée afin de le faire légèrement sécher. Il est ensuite tamisé à 2 mm. Environ 100 g du sol séché et tamisé sont alors placés dans un sachet fermé hermétiquement. Une fois tous les échantillons conditionnés, ils sont envoyés au laboratoire SOLS de l'Université Catholique de Louvain (UCL).

Les échantillons non perturbés sont prélevés dans des cylindres de Kopecki de 100 cm<sup>3</sup>, à raison de deux cylindres par horizon. Le premier sert à la détermination des propriétés physiques au laboratoire du CIRAD (Guadeloupe). Le second est envoyé au laboratoire GERU de l'UCL et est utilisé à la détermination de la courbe teneur en eau – succion des sols (courbe  $\theta$ -h).

Enfin, des cylindres de Kopecki de 1 litre sont extraits de chaque horizon d'un site par type de sol (un brun rouille à halloysite, un brun andique et un andosol) considéré comme représentatifs de ce type de sol. Cet échantillon sert à la détermination de la courbe conductivité hydraulique – succion (courbe K-h) par la méthode du Multistep Outflow au laboratoire de Physique du sol de l'UCL.<sup>7</sup>

## Infiltromètre à succion

### Principe

L'infiltromètre à succion est un appareil qui permet de mesurer, *in situ*, l'infiltration dans un sol non saturé. Une succion est appliquée à la surface du sol, et l'eau ne pénètre ainsi que les

---

<sup>7</sup> L'appareillage nécessaire à la méthode du « Multistep outflow » n'ayant pu être disponible dans les temps, ces cylindres ne seront pas utilisés.

pores dont le diamètre est inférieur à un diamètre limite, fonction de la succion appliquée et défini par la loi de Jurin :

$$r = 2\gamma \cos \theta / P$$

où  $r$  est le rayon de pore,  $\gamma$  la tension superficielle du liquide,  $\theta$  l'angle de contact liquide-surface et  $P$  la pression appliquée.

Pour un sol et de l'eau, les valeurs généralement retenues sont présentées dans le tableau 4.

Pratiquement, la succion étant appliquée à l'infiltromètre grâce à un système de tubes de Mariotte (une membrane poreuse est disposée à la base du dispositif afin de prévenir toute entrée d'air dans le système), les suctions appliquées varient dans une gamme allant de 0 à 20 cm (0-1962 Pa, ou 0-0.02bar), c'est-à-dire proche de la saturation. Il est donc nécessaire de garder en tête que toutes les valeurs déterminées grâce à ce dispositif ne sont valables que dans cette zone.

## En pratique

Pour chaque site, trois répétitions seront effectuées sur chaque horizon. Cela est nécessaire compte tenu de la faible taille de la zone de contact infiltromètre-sol (cercle de 7.1 cm de diamètre). Pour chaque répétition, l'infiltration sera mesurée successivement pour des



**Figure 4 :** Infiltromètre à succion

succions de -10, -6, -3, -1 et 0 cm, depuis la mise en marche jusqu'à ce que le taux d'infiltration soit stable. Les mesures sont prises à pas de temps réguliers, ce pas de temps variant en fonction du taux d'infiltration (généralement, toutes les deux minutes à  $h = -10$  cm et toutes les 15-30 secondes pour  $h = 0$  cm : une dizaine de mesures sont nécessaires pour valider la stabilisation). Le réservoir n'est pas rechargé entre les différentes suctions et aucun déplacement du dispositif n'est donc occasionné pendant les prises de mesures.

Le sol doit être plat et dépourvu d'obstacles apparents (racines, cailloux, etc.). Le sol est nettoyé délicatement et l'infiltromètre y est disposé soutenu par trois pieds. Entre le sol et la membrane de contact, une fine éponge est disposée afin de garantir un contact effectif sur toute la surface.

La succion appliquée est réglée par rapport au zéro atmosphérique. On place l'infiltromètre à l'air libre, sans contact avec le sol. On diminue petit à petit la succion jusqu'à ce qu'on observe un écoulement d'eau. La succion zéro est la succion minimale pour laquelle aucune perte d'eau n'est observée ( $P_0$  effective =  $P$  atmosphérique). Toutes les suctions appliquées ensuite sont calculées par rapport à cette  $P_0$  effective. Cette méthode permet d'éviter les erreurs dues, d'une part, à la distance entre le sol et le point auquel la succion est contrôlée et, d'autre part, aux suctions capillaires qui interviennent dans les tuyaux du dispositif.



## Traitement des données

Les données utilisées sont les mesures du taux d'infiltration stable, exprimées en cm<sup>3</sup>/min. Celles-ci peuvent être utilisées de différentes manières. Nous en détaillerons ici une en particulier, qui nous permettra de caractériser la courbe de conductivité – succion dans le domaine proche de la saturation (Cours d'hydrodynamique des sols, TP7 ; Reynolds et Elrick, 1991). Cette courbe peut être exprimée par l'équation de Gardner :

$$K(h) = K_{sat} \exp(\alpha h)$$

où  $K(h)$  est la conductivité hydraulique à la succion  $h$  [cm.h<sup>-1</sup>],  $K_{sat}$  la conductivité hydraulique à saturation [cm.h<sup>-1</sup>],  $\alpha$  un paramètre lié au sol et  $h$  la succion appliquée [cm] toujours négative (ou nulle).

L'infiltration sous flux constant à partir d'une source circulaire de rayon  $r$  [cm] est obtenue à partir de l'équation de Richards, résolue analytiquement par l'équation de Wooding :

$$Q = \pi r^2 K \left[ 1 + \frac{4}{\pi \alpha} \right]$$

où  $Q$  représente le volume d'eau entrant dans le sol par unité de temps [cm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>] et  $K$  la conductivité hydraulique [cm.h<sup>-1</sup>].

En combinant ces deux équations, on obtient :

$$Q(h) = \pi r^2 K_{sat} \exp(\alpha h) \left[ 1 + \frac{4}{\pi \alpha} \right]$$

Il suffit donc de combiner cette équation pour deux succions différentes et il est alors aisé de déterminer  $\alpha$  et  $K_{sat}$ , qui nous permettent d'établir la courbe recherchée.

Un inconvénient de cette méthode est qu'elle ne nous permet d'utiliser que les mesures de deux succions. La courbe expérimentale déviant parfois très sensiblement du modèle exponentiel proposé, il est nécessaire d'adopter une technique nous permettant d'intégrer les valeurs des cinq succions.

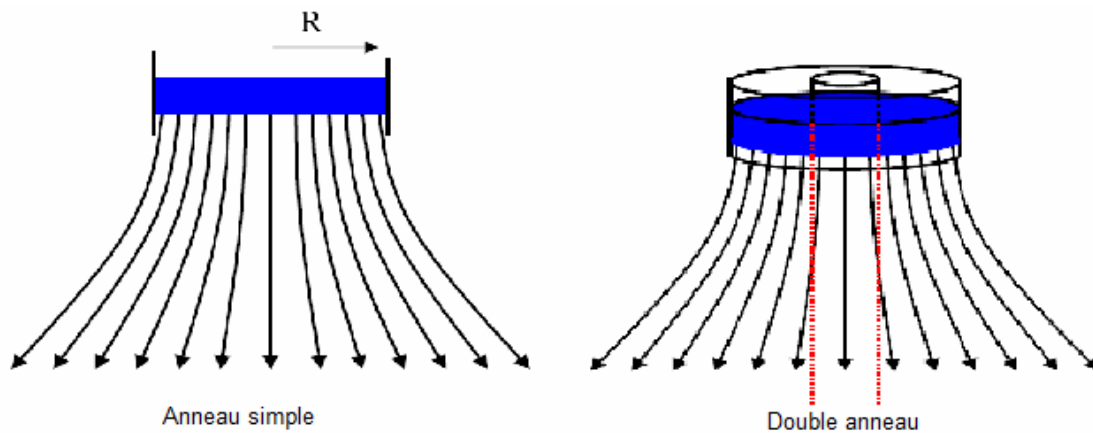
Les paramètres  $\alpha$  et  $K_{sat}$  présentés dans la partie « résultats » seront ainsi déterminés par régression par la méthode des moindres carrés à partir des valeurs d'infiltration mesurées aux cinq succions appliquées. Cette même méthode permettra enfin de déterminer des paramètres uniques pour chaque sol en minimisant la somme du carré des erreurs par rapport aux valeurs d'infiltration des trois répétitions.

## Double anneau

### Principe

Le double anneau est un dispositif qui permet de mesurer le taux d'infiltration d'un sol saturé. Le principe est le suivant : on enfonce un anneau métallique de quelques centimètres dans le sol, on remplit la partie restante d'eau et on observe la vitesse d'infiltration en chronométrant la diminution du niveau d'eau.

Cette méthode pose toutefois un problème. En effet, la diminution du niveau résulte de l'infiltration, mais celle-ci comporte un effet latéral qui conduit à surestimer le taux d'infiltration du sol. Le double anneau solutionne en partie ce problème.



**Figure 5 :** Principe de l'infiltration avec les méthodes de l'anneau simple et du double anneau (Physique du sol : notes de cours (UCL))

Deux anneaux concentriques sont enfoncés dans le sol puis remplis d'eau. Seule la diminution de niveau de l'anneau central est mesurée. L'effet latéral est « pris en charge » par l'anneau extérieur et l'infiltration sous l'anneau central est maintenant supposée parfaitement verticale.

## En pratique

Pour chaque site, une mesure de double anneau a été réalisée en chaque horizon. Toutefois, cette mesure ne fut pas réalisée sur les dix sites du bassin versant Féfé, les mesures étant déjà disponibles.

Le double anneau est réalisé sur sol plat, préalablement nettoyé et dégagé de l'éventuelle végétation qui s'y trouvait. Le sol est mis à saturation 24 heures avant la mesure grâce à un système de réservoirs d'eau (bidons) combinés avec un système de Mariotte, ce qui garantit un niveau d'eau constant au sein des deux anneaux. Une fois cette opération terminée, le système est débranché et la diminution du niveau d'eau est mesurée par pas de temps variables en fonction de la vitesse d'infiltration (entre 15 secondes et 5 minutes selon les sites) sur une descente d'environ 10-15 cm d'eau. Puis l'anneau est rempli et une nouvelle répétition commence. La prise de mesures durant environ deux heures, le nombre de répétitions est variable en fonction



**Figure 6 :** Double anneau avec système de mise à saturation

de la rapidité du processus (entre 1 répétition pour les sols les moins infiltrants jusqu'à 4 répétitions pour les sols plus infiltrants). Durant la prise de mesure, les niveaux de l'anneau extérieur et intérieur sont maintenus à égalité afin d'éviter tout transfert d'eau d'un anneau à l'autre.

Durant le remplissage des anneaux, le sol est recouvert de feuilles de bananes afin de minimiser l'impact destructurant du jet d'eau projeté contre le sol.

## Réserve

Les sols caractérisés sont, de manière générale, très infiltrants. La quantité d'eau nécessaire à la mise à saturation 24 heures avant la prise de mesure est donc très importante et il arrivait régulièrement que les réservoirs soient vides lors de notre arrivée. Nous les remplissions alors, puis remettions le sol à saturation une heure ou deux avant la mesure. La notion de « mise à saturation 24 heures avant la mesure » est donc relative.

De plus, nous observons fréquemment un changement d'aspect de la surface du sol lorsque l'anneau se vidait complètement. Il est donc légitime de se poser la question de la validité des mesures dans le cas où les réservoirs s'avéraient insuffisants à la mise à saturation.

Enfin, la présence d'une lame d'eau d'une dizaine de centimètres sur le sol durant 24 heures a peut-être également un impact sur sa structure. La légitimité de ce protocole est donc à vérifier pour les sols concernés et les résultats liés à cette mesure doivent être envisagés de manière critique.



**Figure 7 :** Effet de l'eau sur l'aspect de la surface du sol après une nuit de mise à saturation

## Mesures en laboratoire

---

Nous détaillerons ici les protocoles utilisés pour les analyses effectuées dans les différents laboratoires. Nous commencerons par la détermination des caractéristiques physiques des sols, effectuée au laboratoire du CIRAD (Guadeloupe). Nous continuerons avec la détermination des différentes courbes caractérisant leur comportement hydrodynamique, réalisée au laboratoire GERU (UCL), puis nous terminerons par les analyses pédologiques, accomplies au laboratoire SOLS (UCL).

### Propriétés physiques

Ces mesures ont été effectuées au laboratoire de la section « Agronomie » de la station du CIRAD de Neufchâteau, sur la commune de Capesterre-Belle-Eau, en Guadeloupe.

Elles ont été réalisées à partir des échantillons non perturbés de 100 cm<sup>3</sup> juste après leur prélèvement. Le sol était à ce moment très proche de la saturation, les cylindres ayant été prélevés sur l'emplacement du double anneau dans l'heure suivant la prise de mesure.

Les échantillons ont été pesés, puis mis à l'étuve à 105°C durant 72 heures, période après laquelle ils sont considérés comme parfaitement secs. Ils ont ensuite été pesés, puis jetés. La tare a alors été pesée et les poids saturés et secs ont ainsi pu être déterminés.

Le volume étant connu, les densités apparentes fraîches et sèches ont été calculées, ainsi que les teneurs en eau volumiques et pondérales. Les valeurs de l'indice des vides et la porosité ont également pu être calculées sur base de valeurs de références pour la densité réelle (tableau 2).

**Tableau 2 : Densité réelle des sols : valeurs de référence (Dorel, 2001)**

Type de sol	Horizon	Densité solide [g.cm <sup>-3</sup> ]
Brun rouille à halloysite (BR)	A	2.75
	B	2.75
Brun andique (BA)	A	2.61
	B	2.68
Andosol (AN)	A	2.41
	B	2.61
Andosol perhydraté (AP)	A	2.38
	B	2.61

### Courbes caractéristiques

Les courbes de teneur en eau – succion ( $\theta$ -h) ont été déterminées pour chacun des sols. Les courbes conductivité – succion (K-h) ont été mesurées *in situ* grâce à l'infiltromètre à succion. Nous avons vu que cette technique était cependant limitée au domaine proche de la saturation.

Le Multistep Outflow est un appareil qui permet de dessiner ces courbes pour des suctions allant de 0 à 1 bar. Six sols devaient initialement faire l'objet de cette caractérisation. Toutefois, le montage et le réglage de l'appareil n'étant pas encore terminé, cette manipulation n'a pas été possible dans le cadre de ce travail. Nous rappellerons en quelques lignes les grands principes de cette technique, mais ne nous attarderons donc pas dessus.

## Courbes $\theta$ -h

Les courbes  $\theta$ -h ont été déterminées pour chacun des horizons à partir des cylindres de 100 cm<sup>3</sup> de pF 0 à pF 4.2. Pour la portion de courbe allant de pF 0 à pF 1.8, la technique du « bac à sable » fut utilisée. Pour celle allant de pF 2 à pF 4.2, ce fut celle de la « casserole à pression ».

Dans les deux cas, la méthode consiste à exercer sur le sol plusieurs pressions ou suctions contrôlées, et de peser la diminution de poids entre deux de ces paliers. La diminution de poids de l'échantillon correspond à la perte d'eau. Une fois toutes les mesures prises, l'échantillon est séché à l'étuve à 105°C pendant 48 heures, puis pesé. Il suffit de faire la différence entre le poids sec et le poids humide à succion contrôlée pour connaître la teneur en eau de l'échantillon à cette succion.

Le « bac à sable » est donc utilisé pour caractériser la première partie de la courbe. Les pas utilisés sont pF 0, pF 1, pF 1.5 et pF 1.8. Un bac à sable recouvert d'une membrane poreuse sur lequel sont disposés les échantillons est relié à un système de Mariotte qui, par différence de niveau entre le bac et le niveau du vase, permet d'exercer une succion sur le sable qui s'exerce alors à son tour sur les échantillons. Une fois le système mis en place, une période de cinq jours est nécessaire pour atteindre l'équilibre. La succion appliquée étant créée par une différence de niveau entre deux récipients, il est difficile de descendre en dessous d'une certaine succion avec cette méthode (raisonnablement, de l'ordre de 1-2 m, c'est à dire 0.2 bar).

La casserole à pression permet de monter à des pressions de l'ordre de 15 bars. Les pas appliqués sont pF 2.4, pF 3, pF 3.5, pF 4 et pF 4.2. Dans la casserole, les échantillons sont disposés sur une plaque poreuse reliée à l'extérieur par un tuyau permettant à l'eau d'être évacuée. Une fois la casserole hermétiquement fermée, une pression précise y est appliquée à l'aide d'un générateur de pression. Une période d'équilibrage de trois à cinq jours est recommandée. Les échantillons sont pesés après chaque pas.

Pour les pF 2.4 et 3, les échantillons utilisés sont les cylindres de 100 cm<sup>3</sup>. Pour les pressions supérieures, les échantillons sont déstructurés et saturés en eau au préalable, ce qui permet de limiter à trois jours la période nécessaire de mise à l'équilibre. Cette manipulation est permise car, à cette succion, les pores concernés ont un diamètre maximal de 0.5  $\mu$ m et seule la texture est déterminante.

Le tableau ci-dessous reprend de manière systématique les étapes effectuées pour la détermination de la courbe  $\theta$ -h.

**Tableau 3 : Détermination de la courbe  $\theta$ -h**

<b>pF</b>	<b>Succion [cm] Pression [Bar]</b>	<b>Matériel utilisé</b>	<b>Echantillon</b>	<b>Equilibre</b>	<b>Pesée</b>
<b>0</b>	1 cm	Bac à sable	Structuré (100 cm <sup>3</sup> )	5 jours	Frais
<b>1</b>	10 cm	Bac à sable	Structuré (100 cm <sup>3</sup> )	5 jours	Frais
<b>1.5</b>	31 cm	Bac à sable	Structuré (100 cm <sup>3</sup> )	5 jours	Frais
<b>1.8</b>	63 cm	Bac à sable	Structuré (100 cm <sup>3</sup> )	5 jours	Frais
<b>2.4</b>	0.25 bar	Casserole à pression	Structuré (100 cm <sup>3</sup> )	5 jours	Frais
<b>3</b>	1 bar	Casserole à pression	Structuré (100 cm <sup>3</sup> )	5 jours	Frais
<b>3.5</b>	3.1 bars	Casserole à pression	Déstructuré	3 jours	Frais + sec
<b>4</b>	10 bars	Casserole à pression	Déstructuré	3 jours	Frais + sec
<b>4.2</b>	15.8 bars	Casserole à pression	Déstructuré	3 jours	Frais + sec

Une fois les teneurs en eau mesurées aux différentes succions, il ne reste plus qu'à les présenter sous forme de graphe avec, en abscisse, la succion imposée (exprimée sous forme de pF) et, en ordonnée, la teneur en eau (exprimée en pourcentages volumiques).

Pour modéliser cette courbe, nous utiliserons l'équation de Van Genuchten :

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)$$

où  $\theta(h)$  représente la teneur en eau à la succion  $h$  [%],  $\theta_r$  la teneur en eau résiduelle [%],  $\theta_s$  la teneur en eau à saturation [%],  $\alpha$  un paramètre empirique lié au sol [m<sup>-1</sup>],  $h$  la succion [m] et  $n$  un paramètre empirique lié au sol.  $n$  est défini comme étant égal à  $1-1/n$ .

Les paramètres de cette équation sont déterminés pour chacun des sols par la méthode des moindres carrés.

**Tableau 4 : Succion appliquée et diamètre de pores équivalent (Dorel, 2001)**

<b>Potentiel hydrique (pF)</b>	<b>Succion appliquée [kPa]</b>	<b>Rayon de pore équivalent [<math>\mu</math>m]</b>
1	1	150
1.5	3.1	50
2	10	15
2.5	31	5
3	100	1.5
3.5	316	0.5
4	1000	0.15
4.2	1585	0.1

## Paramètres pédologiques

Un grand nombre de paramètres pédologiques furent déterminés. Comme nous l'avons déjà expliqué, quatre nous intéressent particulièrement : les teneurs en allophane, en ferrihydrite et en matière organique, et la granulométrie dite « apparente ». Cette dernière ne fut cependant pas mesurée dans le cadre de ce travail par faute de temps. Nous ne reviendrons donc pas dessus.

### Allophane et ferrihydrite

Silicium, aluminium et fer présents dans les allophanes, imogolite, ferrihydrite et complexes humiques ( $Si_o$ ,  $Al_o$  et  $Fe_o$ ) ont été extraits sélectivement à l'oxalate d'ammonium (0.2M, pH=3) pendant 4 heures à l'obscurité, pour un rapport sol : solution de 1 : 50. Ce réactif a une action très limitée sur les oxydes et minéraux argileux cristallins, mais est très efficace pour dissoudre les oxydes amorphes et les oxydes hydriques. Les cations extraits ont ensuite été dosés par spectrophotométrie d'émission de plasma.

Ces mêmes cations ont également été extraits au pyrophosphate de sodium ( $Na_4P_2O_7$ , 0.1M, sol : solution = 1 : 100, 16 heures) ( $Si_p$ ,  $Al_p$  et  $Fe_p$ ). Ce réactif permet d'extraire le Fe et l'Al liés à la matière organique, sans agir spécifiquement sur les constituants minéraux. Les quantités dosées sont donc la somme des cations libres et associés à la matière organique. Le dosage se fait par absorption atomique.

Les équations suivantes permettent alors d'estimer les teneurs en ferrihydrite et en allophane (Mizota et van Reeuwijk, 1989, p 42 ; Henao-Toro, 2002) :

$$\% \text{ ferrihydrite} = \% Fe_o \cdot 1.7$$

$$\% \text{ allophane} = (100 / y) \cdot Si_o$$

où  $y = -5.1x + 23.4$  et  $x = \frac{Al_o - Al_p}{Si_o}$ , y représentant donc le pourcentage de silicium dans les allophanes.

### Carbone et azote

La teneur totale en carbone et azote a été déterminée pour nos sols. Pour ce faire, un « NC soil analyser (Thermo) » de marque Finnigan fut utilisé.

Le principe de cette détermination est le suivant : le carbone et l'azote sont oxydés en  $CO_2$  et  $N_2$  par chauffage dans un courant d'oxygène. Cette réaction est catalysée par du cuivre. Les éléments résultants ( $N_2$ ,  $CO_2$  et  $H_2O$ ) sont ensuite séparés sur une colonne de chromatographie sous un courant d'hélium.

La conductivité thermique est enfin mesurée par un détecteur, et les teneurs en sont déduites.

Notons que, pour nos sols, les pH sont relativement acides et les teneurs en carbonates peuvent donc être négligées. Les teneurs en carbone total peuvent donc être considérées comme équivalentes à celles en carbone organique.

La matière organique est évaluée en multipliant la teneur en C organique par 1.724, ce qui revient à considérer que 100g de matière organique contiennent 58g de carbone (De Leenheer *et al*, 1957 ; Nelson et Sommers, 1989 ; cités par Henao-Toro, 2002).

## **Autres analyses pédologiques**

D'autres analyses ont été réalisées mais ne seront pas directement utilisées dans cette étude. Nous passons ici rapidement en revue les différentes analyses effectuées et les méthodes utilisées.

### **CEC et bases échangeables**

Ces propriétés ont été déterminées par percolation sur colonne. Le principe est le suivant : une colonne contenant un mélange de sol et de sable lavé est mise en place. Une première percolation d'acétate d'ammonium ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , 1N, pH 7) permet de déplacer les bases adsorbées et de les récupérer. Cette étape permet également la saturation des sites d'échanges en  $\text{NH}_4$ . Le percolat est récupéré et les cations (Ca, Mg, K, Na) sont dosés par absorption atomique.

Une percolation à l'éthanol est ensuite effectuée afin d'éliminer l'ammonium excédentaire non fixé. Enfin, une dernière percolation au KCl (10%, pH 3) permet de récupérer les ions ammonium adsorbés. La CEC équivaut à la quantité de  $\text{NH}_4$  récupérée, qui est déterminée par distillation.

### **Acidité**

Le pH fut déterminé à l'aide d'un pH-mètre après une heure d'agitation d'un mélange sol : solvant (1 : 5). Les solvants utilisés sont l'eau (pH- $\text{H}_2\text{O}$ ) et le chlorure de potassium (1M) (pH-KCl).

Nos sols étant relativement acides, nous avons ensuite déterminé l'acidité échangeable (dosage de Al et H échangeables). Une percolation (cf. détermination de la CEC) de KCl (1N) est réalisée. Le percolat est titré au NaOH (détermination de l'acidité échangeable totale). 10 ml de NaF sont ensuite ajoutés et la solution est titrée à l'HCl (0.1N) (détermination de Al échangeable).



**Tableau 5 : Récapitulatif des données récoltées**

	<b>BR</b>		<b>BA</b>		<b>AN</b>		<b>AP</b>	
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Description de profil</b>	5	5	5	5	5	5	9	-
<b>Echantillons perturbés</b>	5	5	5	5	5	5	9	-
<b>Cylindres 100 cc</b>	10	10	10	10	10	10	18	-
<b>Cylindres 1 l</b>	1	1	1	1	1	1	0	-
<b>Double anneau</b>	5	5	5	5	5	5	0	-
<b>Infiltromètre à succion</b>	5 x 3	5 x 3	5 x 3	5 x 3	5 x 3	5 x 3	9 x 3	-
<b>Paramètres physiques</b>	5	5	5	5	5	5	9	-
<b>Paramètres pédologiques</b>	5	5	5	5	5	5	9	-
<b>Courbes <math>\theta</math>-h</b>	5	5	5	5	5	5	9	-

## Résultats

L'objectif de notre travail étant de comparer comportement hydrodynamique et caractéristiques pédologiques, de nombreux paramètres ont été déterminés pour chacun de nos sols.

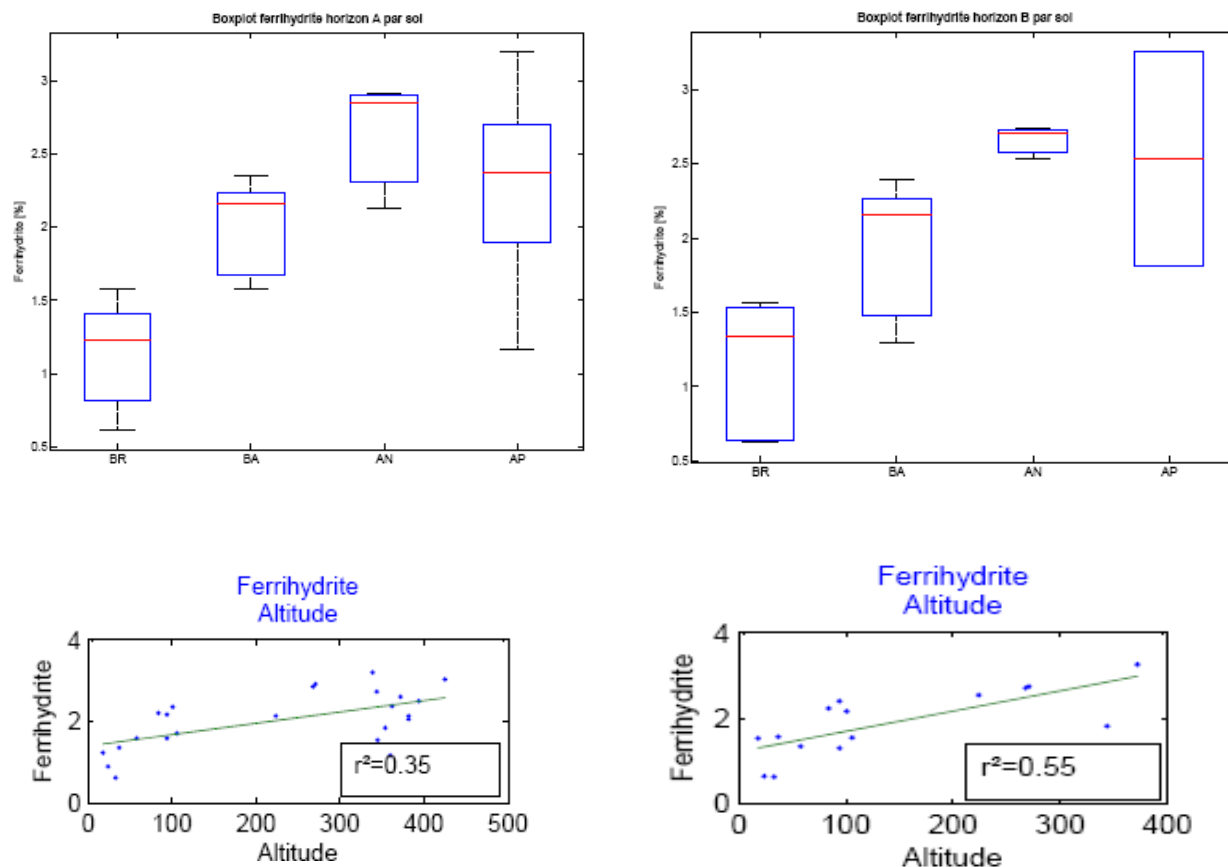
Dans cette partie, nous présentons de manière systématique les données collectées lors de nos différentes campagnes de prise de mesures et de nos expériences. Le nombre de données étant assez élevé, nous les présentons ici de manière synthétique sous forme de « boxplot », obtenus à l'aide du logiciel MATLAB. La liste exhaustive des données se trouve en annexe.

Nous commençons par passer en revue les données pédologiques. Nous poursuivrons ensuite avec les paramètres physiques et les courbes de rétention, avant de terminer avec les mesures de conductivité hydrauliques.

Pour rappel, les sols brun rouille sont abrégés en BR, les sols bruns andiques en BA, les andosols en AN et les andosols perhydratés en AP.

### Données pédologiques

#### Ferrihydrite



**Figure 8 :** Ferrihydrite présentée par sol et par rapport à l'altitude en horizons A (gauche) et B (droite)

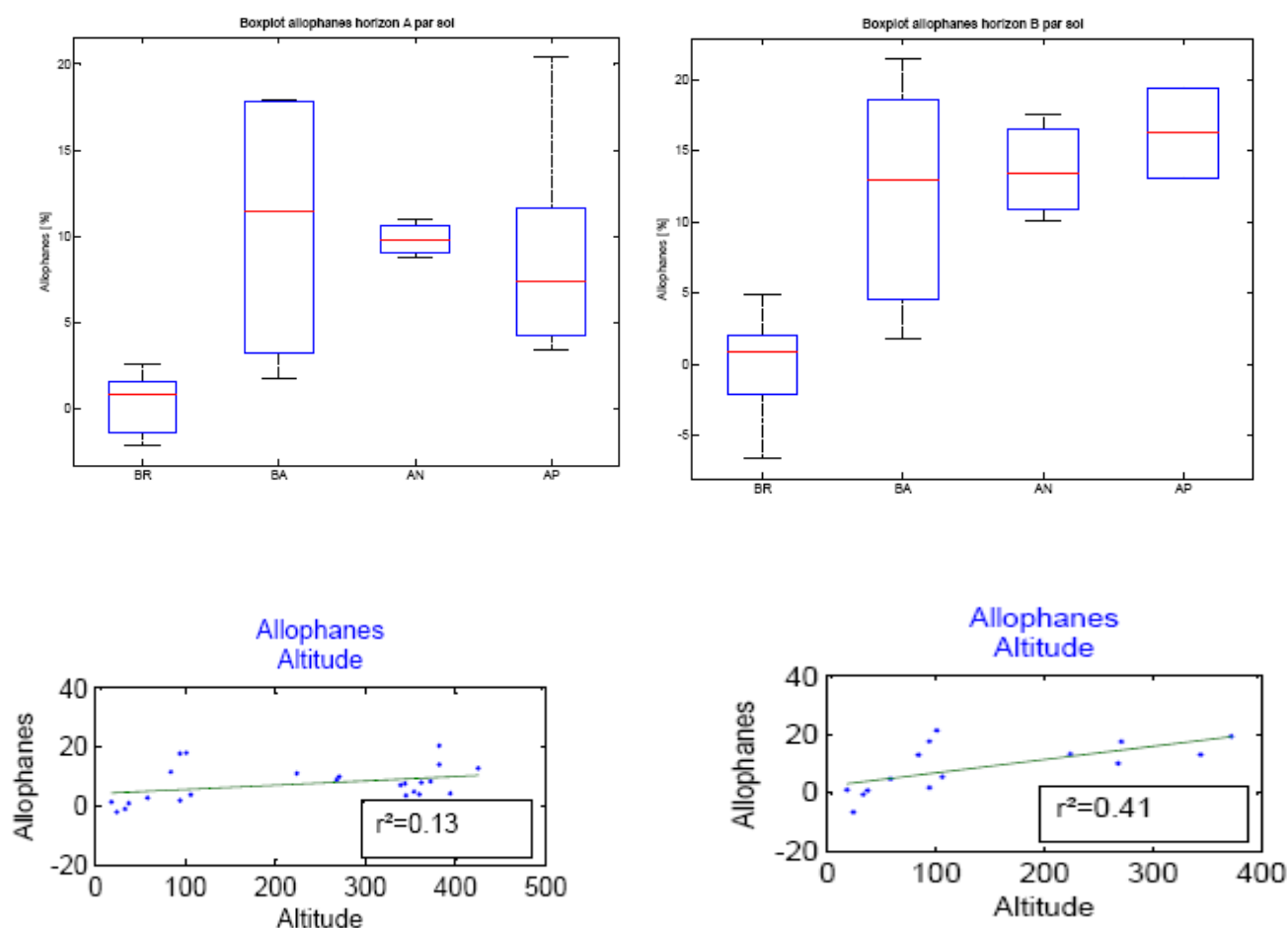
Dans le chapitre « Etat de la recherche », nous avons vu que seuls certains paramètres pédologiques ont un impact déterminant sur la structure du sol. Nous ne présenterons ici que les résultats obtenus pour ces caractéristiques d'intérêt – ferrihydrite, allophane et carbone –, les données complètes étant disponibles en annexe.

Trois remarques méritent d'être formulées par rapport à ces données. Tout d'abord, la cohérence entre horizons est assez forte : les tendances sont similaires et les conclusions pour un horizon particulier restent valables pour l'autre.

Ensuite, la variabilité assez importante des andosols perhydratés (AP) par rapport aux trois autres classes de sol doit être soulignée. En horizon A, cela peut s'expliquer par le plus grand nombre de sites caractérisés (11 AP, contre 5 sols brun rouille (BR), 5 sols bruns andiques (BA) et 3 andosols (AN)). En horizon B par contre, seuls deux AP ont été caractérisés. Cet échantillon n'est donc pas valablement représentatif.

Enfin, et malgré ces réserves, la corrélation entre les teneurs en ferrihydrite et l'altitude, de même que les types de sol, est évidente. Cet élément devra donc être pris en compte lors de notre future analyse comparative.

## Allophane



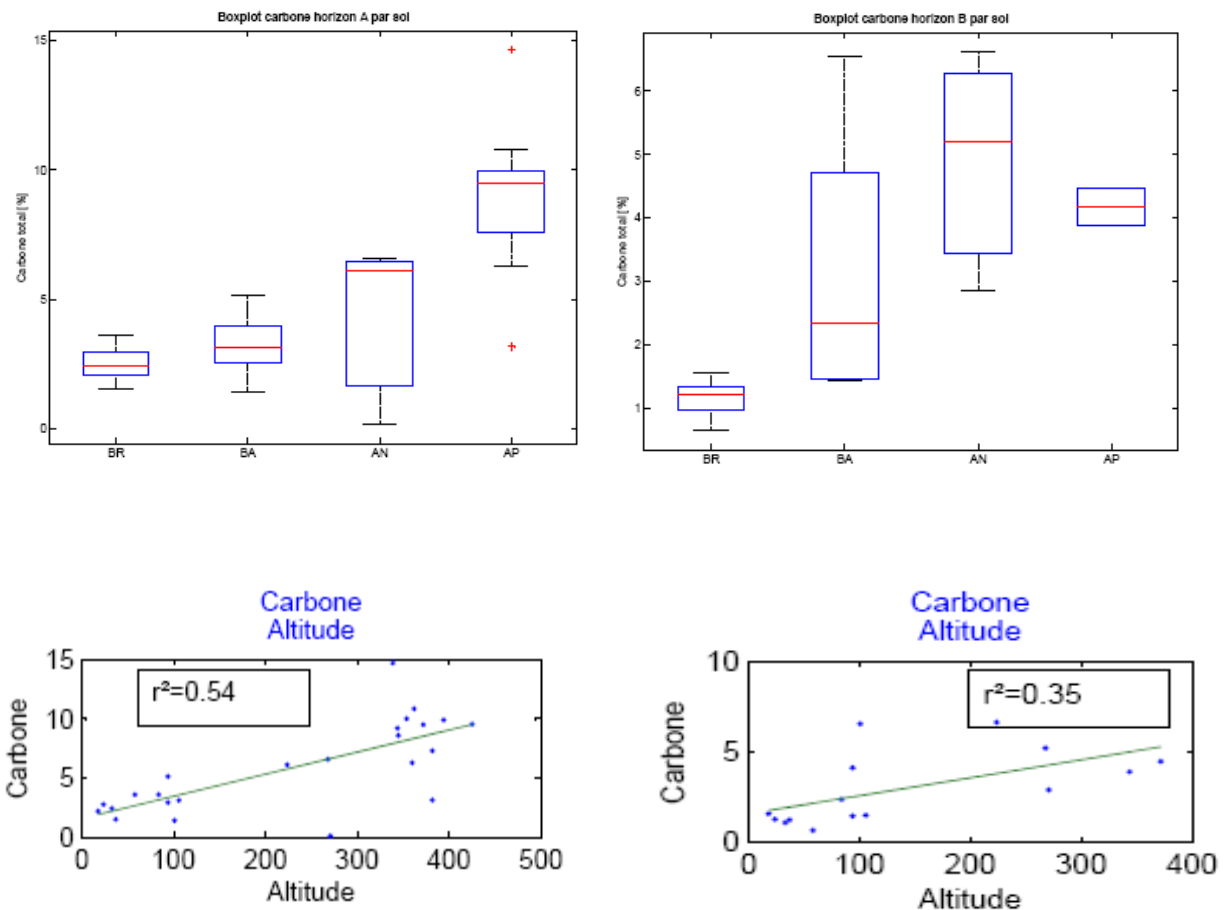
**Figure 9 :** Teneurs en allophane pour les horizons A (gauche) et B (droite)

Deux observations doivent ici être mentionnées. Tout d'abord, la variabilité des sols BA pour ce paramètre est nettement plus importante que pour les autres classes de sol.

Une différence entre horizons est ensuite constatée. En horizon A, une éventuelle corrélation avec le type de sol ou l'altitude est floue. Seuls les sols BR se détachent assez nettement, en présentant des teneurs en allophane particulièrement faibles. Cette dernière remarque est cohérente avec les conclusions des auteurs présentés au premier chapitre. En horizon B par contre, cette corrélation est plus évidente, et les sols BR se détachent également.

Cette différence entre horizons est confirmée par le coefficient de détermination ( $r^2$ ) par rapport à l'altitude, non significatif pour l'horizon A et moyennement significatif pour l'horizon B.

## Carbone total



**Figure 10 :** Teneurs en carbone total des horizons A (gauche) et B (droite)

Une fois encore, de grandes différences de variabilité interne sont constatées au sein des classes de sol. Les valeurs des AN sont particulièrement dispersées, de même que celles des BA en horizon B.

L'ordre de grandeur des teneurs en carbone varie avec les horizons, ce qui est tout à fait cohérent avec la théorie. De même, ces teneurs sont corrélées avec l'altitude, quel que soit l'horizon considéré. Elles augmentent lorsque l'altitude, et donc la pluviométrie, augmente. Plus l'altitude augmente, plus les différences entre sols sont importantes. La relation aurait donc une allure exponentielle.

La théorie est donc dans ce cas parfaitement vérifiée.

## **Conclusion**

Comme annoncé dans le premier chapitre, les paramètres pédologiques sont corrélés tant aux classes de sol qu'à l'altitude, et varient le long de la séquence. Pour tous les paramètres traités, les teneurs augmentent avec l'altitude.

Pour la teneur en ferrihydrite, cette augmentation est graduelle pour les BR, BA et AN, mais une stabilisation, voire une diminution, survient lors du passage des AN aux AP.

Pour la teneur en allophane, un « saut » est observé entre les BR et les AN, et les teneurs mesurées chez les BA, intermédiaires entre ces deux classes, sont particulièrement dispersées.

Enfin, si les teneurs en carbone sont, comme attendu, beaucoup plus élevées en horizon A, les tendances sont similaires pour les deux horizons. Ces teneurs augmentent avec l'altitude, et un « saut » est observé lors du passage de BA à AN.

Les paramètres pédologiques sont donc cohérents avec les tendances décrites par la littérature pour ce type de séquence d'altération.

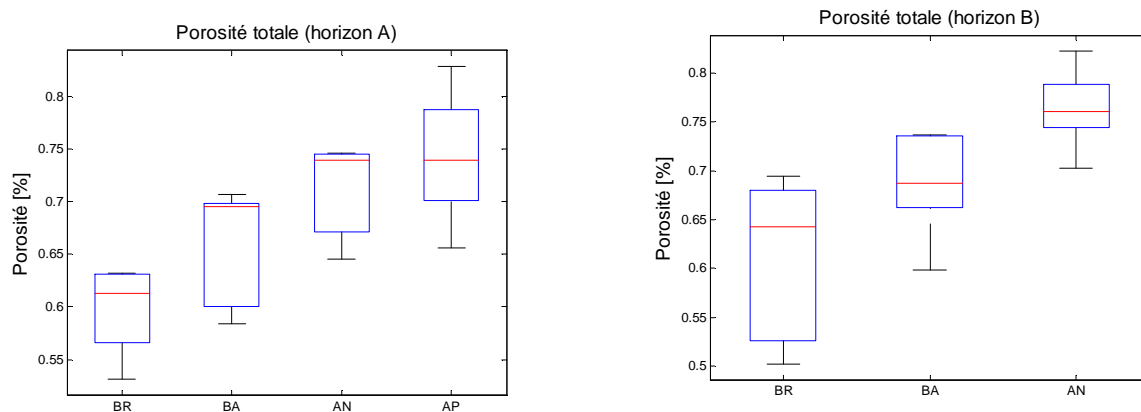
## Rétention d'eau

Nous présentons ici les paramètres dits hydrostatiques, à savoir les paramètres relatifs à la rétention d'eau dans nos sols.

Nos commençons par un paramètre global : la porosité. Viennent ensuite les valeurs de teneurs en eau à différentes succions mesurées en laboratoire, et nous terminons par les paramètres de l'équation de van Genuchten.

### Paramètres physiques

Nous ne présenterons ici que la porosité, les nombreux paramètres généralement utilisés étant redondants. La porosité totale a ici été obtenue à partir du poids sec de nos échantillons et des valeurs de densité solide de la littérature (Dorel, 2001).



**Figure 11 :** Porosité en horizons A (gauche) et B (droite)

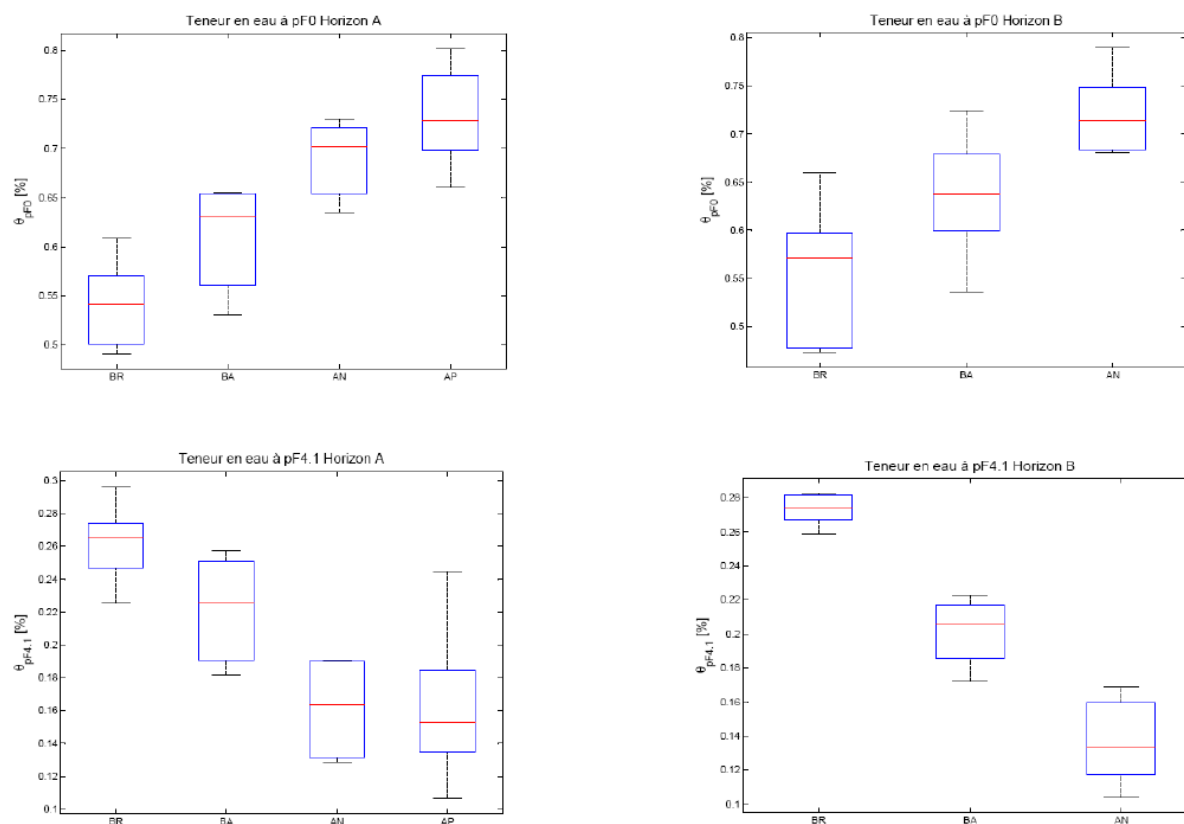
La porosité augmente avec l'altitude. Ce paramètre est donc indéniablement corrélé à la séquence. Les sols BR sont les moins poreux, et les AP les plus poreux.

### Courbes de rétention

La figure 13 présente les courbes de rétention des différentes classes de sol et horizons. Les points représentent les mesures expérimentales et les courbes sont construites à partir de l'équation de van Genuchten (cf « Matériel et méthode »).

Deux observations peuvent être formulées. Tout d'abord, l'allure des courbes varie sensiblement d'une classe de sol à l'autre. Elles sont plus « plates » en bas de séquence et plus « abruptes » en haut. Cet effet est matérialisé par le paramètre «  $n$  » de l'équation de van Genuchten, qui représente la distribution des pores. Nous vérifierons si cette tendance se confirme au regard de ce paramètre au chapitre suivant.

Il est important de souligner que, l'équation de van Genuchten étant unimodale, elle ne permet pas de modéliser des courbes ayant plusieurs points d'inflexion, comme c'est le cas pour certains de nos sols, en particulier les BR et les BA.



**Figure 12 :** Teneurs en eau mesurées à  $pF 0$  et  $pF 4.1$

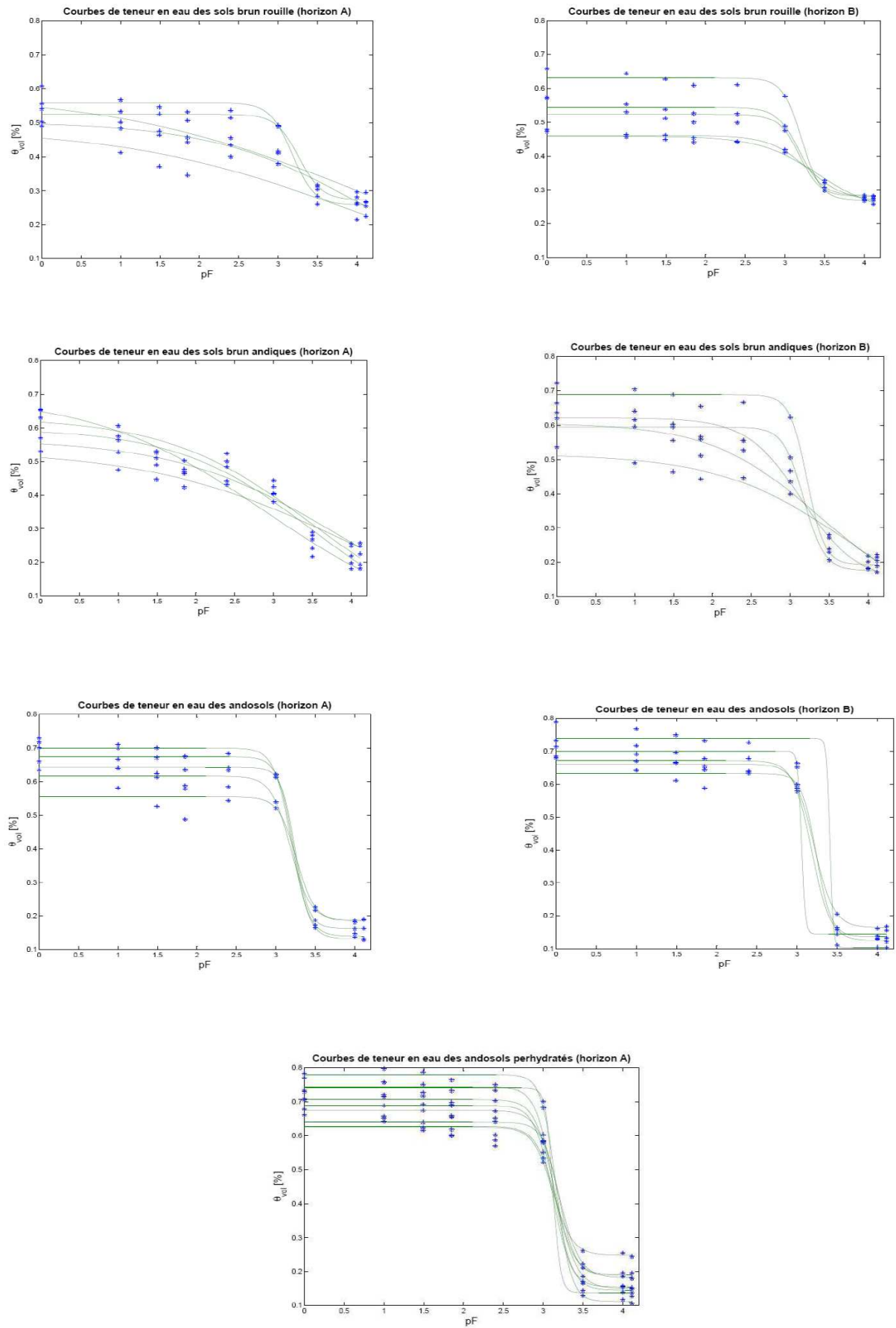
Ensuite, les valeurs limites varient sensiblement entre classes pédologiques. Les écarts entre  $\theta_{sat}$  et  $\theta_{pF 4.1}$  sont plus élevés en haut de séquence. La figure 12 présente, sous forme de « boxplot », les mesures expérimentales pour ces deux paramètres.

Notons également qu'aucune variation de volume ne fut observée jusqu'à  $pF 3$ . Les échantillons étant déstructurés pour les succions supérieures, le volume n'est plus estimable à partir de  $pF 3.5$ . Une diminution du volume des andosols est toutefois signalée par Dorel *et al* (2000) à partir de  $pF 2$ . Les valeurs de teneur en eau à forte succion sont donc à prendre avec précautions pour ces sols.

La figure 12 montre que la tendance est similaire pour chaque horizon. Les BR ont des teneurs en eau résiduelles élevées et des teneurs en eau à saturation faibles. C'est exactement l'inverse pour les sols du haut de la séquence.

Chez les BR, les teneurs en eau passent de 55% à saturation à 25% au point de flétrissement. A l'opposé, les AN passent de 70 à 15% pour les mêmes succions.

Cette tendance est régulière le long de la séquence.



**Figure 13 : Courbes de teneurs en eau ( $\theta$ -h)**



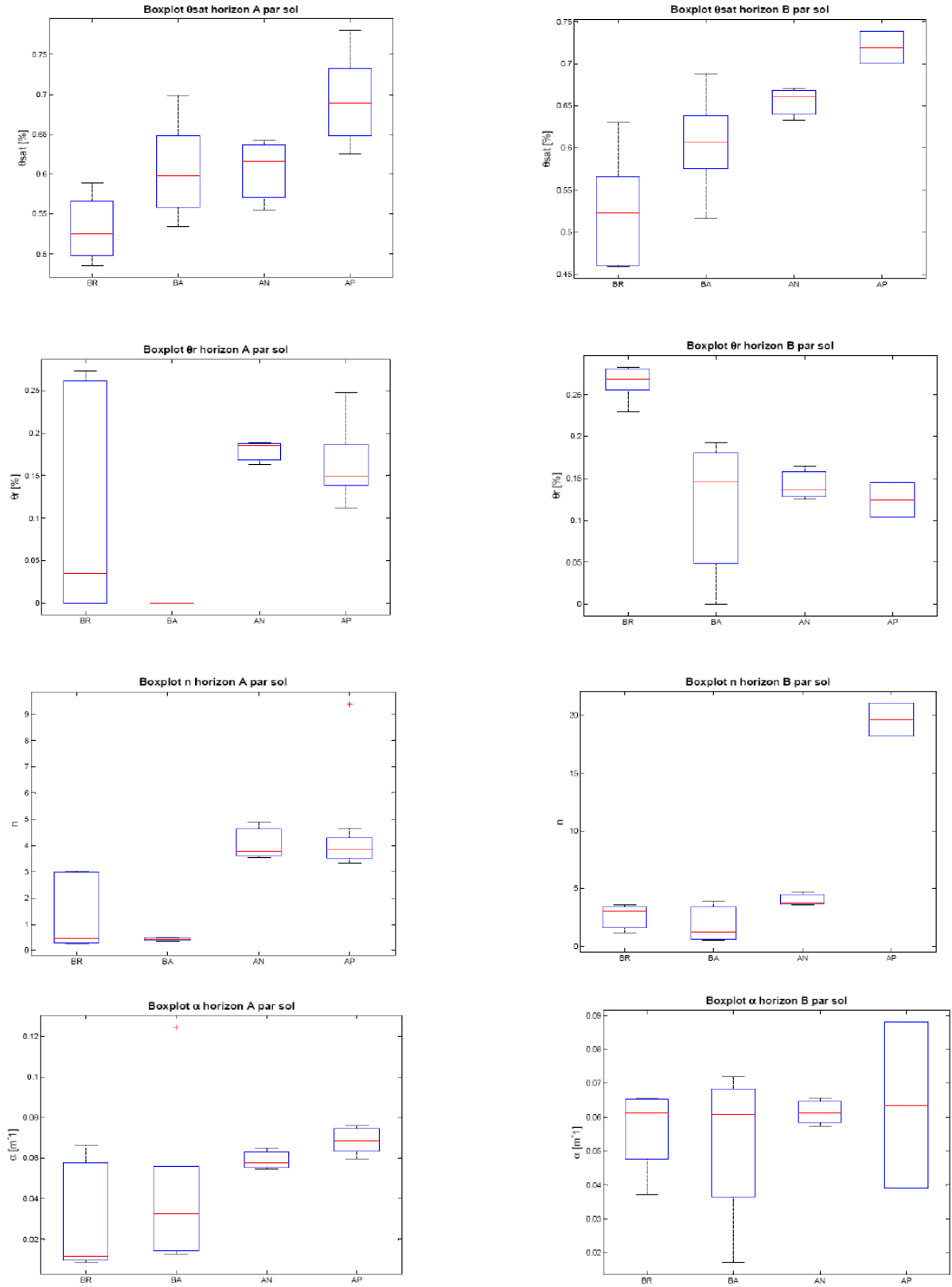
## Equation de van Genuchten

La figure 14 présente les paramètres de van Genuchten obtenus pour chacun de nos sols.

L'évolution de  $\theta_{\text{sat}}$  observée expérimentalement se retrouve ici. Le paramètre  $\theta_r$ , qui correspond à la teneur en eau résiduelle, est par contre plus approximatif.

Le paramètre  $n$ , indicateur de la pente maximale de la courbe, suit une évolution de type exponentielle en horizon B, mais la tendance est moins claire en horizon A. Il est important de noter que, dans tous les cas, les valeurs des BR et BA sont inférieures à celles obtenues pour les AN et AP.

Enfin, une légère tendance est observable au niveau du paramètre  $\alpha$  en horizon A, qui augmente sensiblement avec l'altitude, mais rien de tel en horizon B, où les moyennes sont rigoureusement identiques.



**Figure 14 :** Présentation des paramètres de l'équation de van Genuchten en horizons A (gauche) et B (droite)

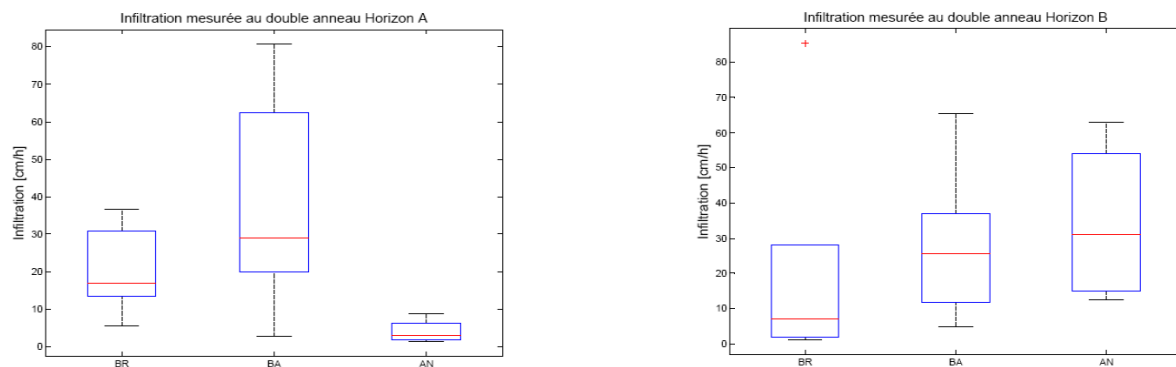
## Conductivité hydraulique

Nous présentons ici les données hydrodynamiques, c'est à dire toutes les mesures relatives à la conductivité hydraulique de nos sols. Nous commencerons par les paramètres mesurés à l'aide de l'infiltromètre et du double anneau.

Nous reviendrons ensuite sur les courbes de conductivité hydraulique – succion (K-h), établies à partir de l'équation de Gardner.

### Infiltration

La figure 15 présente les valeurs d'infiltration obtenues à l'aide du double anneau (infiltration à saturation). Trois classes de sol sont représentées sur ces graphes. Les deux seuls sites sur AP caractérisés par cette technique ont en effet été combinés avec les AN pour les représentations.



**Figure 15 :** Infiltration mesurée au double anneau

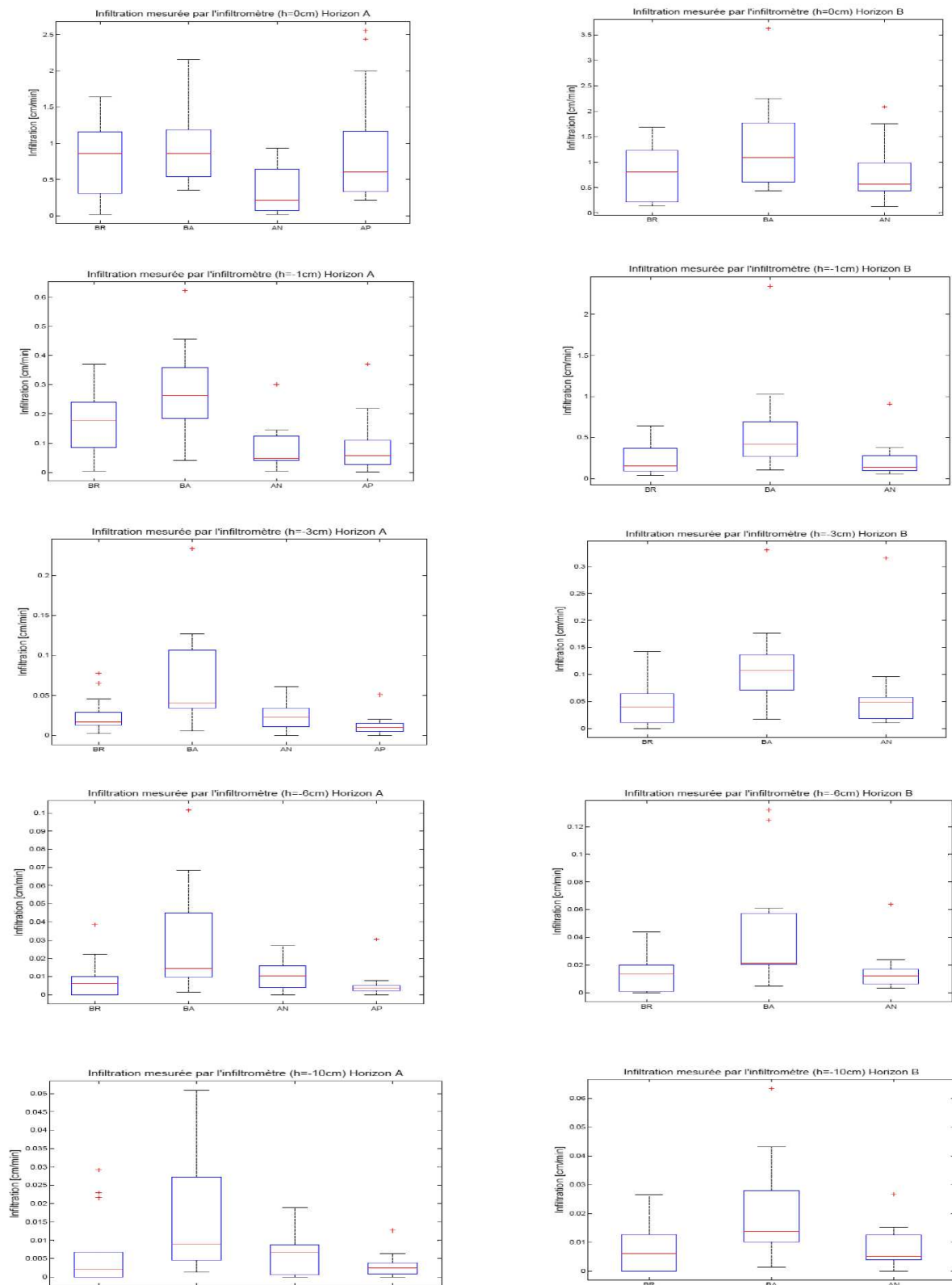
Aucune tendance n'est observée en horizon A. En horizon B, par contre, l'infiltration augmente avec l'altitude, mais la variance interne aux classes de sol est très importante.

Voyons maintenant si les résultats des mesures effectuées avec l'infiltromètre présentent les mêmes tendances (figure 16).

Ici, les tendances ne sont pas linéaires.

En horizon A, les BA sont systématiquement très variables, et c'est pour cette classe que les valeurs maximales sont mesurées. Les BR ont des valeurs d'infiltration faibles à forte succion et élevées à faible succion. Les AN et AP ont des valeurs globalement faibles, à l'exception de  $h=0$  pour les AP.

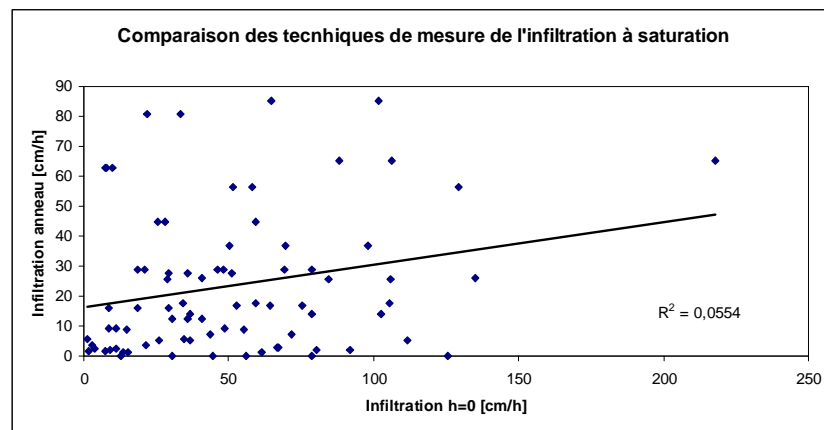
En horizon B, toutes ces observations restent valables, mais de manière moins évidente. Les valeurs d'infiltration ont en effet tendance à y être plus uniformes.



**Figure 16 :** Infiltration mesurée avec l'infiltromètre à suction

Enfin, il est important de noter qu'aucune corrélation n'est observée entre les valeurs d'infiltration mesurées au double anneau (infiltration à saturation) et celles mesurées avec

l'infiltromètre à succion à  $h = 0$  cm (figure 17). Nous reviendrons sur ce point au chapitre suivant.



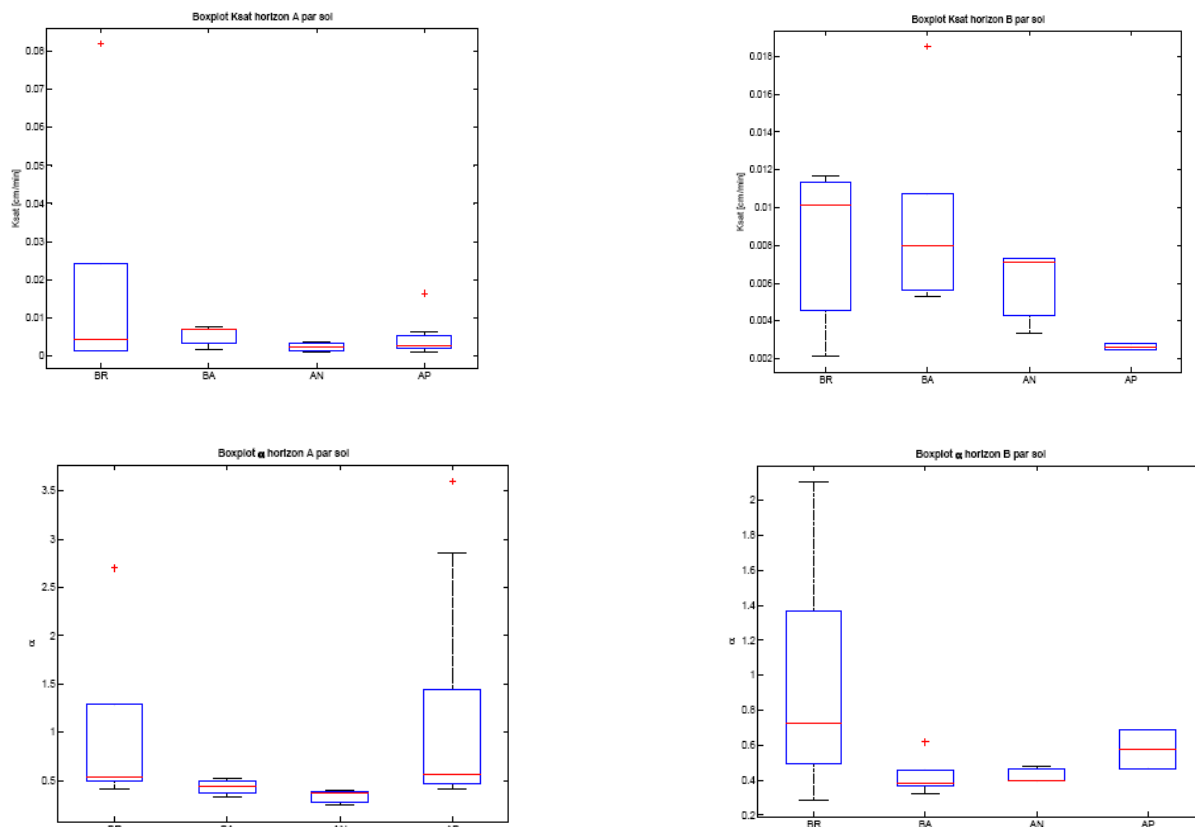
**Figure 17 :** Comparaison des infiltrations mesurées au double anneau et à l'infiltromètre à succion

## Equation de Gardner

A partir des mesures expérimentales obtenues avec l'infiltromètre à succion, la courbe de conductivité a été déterminée en utilisant l'équation de Gardner (« Matériel et méthode »). Les deux paramètres de cette équation sont  $K_{sat}$  et  $\alpha$ . La figure suivante les présente, une fois encore sous forme de « boxplot ».

Pour rappel, pour chacun des 39 horizons caractérisés, trois répétitions ont été réalisées. Les paramètres de la courbe de conductivité - teneur en eau ( $K-h$ ) ont été modélisés par répétition et par site. Par manque d'espace, nous ne présenterons ici que les résultats par site.

De plus, ces paramètres ont été déterminés à la fois sur base des cinq suctions mesurées ( $h = 0, -1, -3, -6$  et  $-10$  cm) et sur base des quatre suctions les plus importantes. Les tendances observées ne variant pas sensiblement entre ces deux déterminations, nous ne présenterons ici que les paramètres obtenus à partir des cinq mesures.



**Figure 18 :** Paramètres  $K_{sat}$  (au dessus) et  $\alpha$  (en dessous) de l'équation de Gardner

Au vu de ces résultats, plusieurs observations peuvent être faites. Tout d'abord, la forte variabilité relative des valeurs pour les sols BR est flagrante. De plus, la variabilité entre type de sol est faible, voire nulle, et en tout cas nettement inférieure à la variabilité interne de nombreux groupes. Il sera donc a priori difficile de discriminer nos sols en lien avec leur appartenance à une catégorie pédologique sur base de ces paramètres, et donc sur base des valeurs d'infiltration.

Seule une légère tendance en horizon B, par rapport à  $K_{sat}$ , peut éventuellement être soulignée. En effet, une diminution de ce paramètre avec l'altitude est observée. La régression linéaire confirme cette tendance mais reste très vague ( $r^2=0.22$ ).

Ces observations étant très imprécises, il nous semble nécessaire de clarifier cet aspect. Diverses analyses statistiques seront réalisées sur ces données. Les résultats de ces analyses sont présentés au chapitre suivant.

## Analyse et discussion

Dans cette dernière partie, nous allons analyser les différents résultats présentés au chapitre précédent au regard des objectifs poursuivis.

Ce chapitre est donc organisé selon la présentation des objectifs du premier chapitre.

### ***Classification et paramètres pédologiques***

Le premier objectif consistait à comparer classes et paramètres pédologiques et à vérifier que nos sols reflètent effectivement les tendances attendues le long de la séquence.

#### **Ferrihydrite**

Les résultats présentés (figure 8) montrent que la présence de ferrihydrite est corrélée à la séquence. Les sols BR, BA et AN suivent une tendance très claire, avec une augmentation des teneurs en ferrihydrite proportionnelle à l'altitude. Elle diminue toutefois au niveau des AP, et sa variabilité est pour ces sols très importante, quel que soit l'horizon considéré.

Les mesures pour cette dernière classe sont toutefois à prendre avec précaution. Nous avons en effet expliqué que le choix des sites de mesure avait été soigneusement réfléchi afin d'éliminer l'effet de nombreux paramètres non pris en compte dans ce travail. Concernant les andosols toutefois, 9 sites sur 11 ne correspondent pas à ces standards. Ils furent en effet caractérisés en raison d'études préalables effectuées sur ces sites, et leur sélection repose donc sur des critères différents.

Ceci permet en tout cas d'expliquer la variabilité importante observée en horizon A. En horizon B, nous nous rappellerons que le nombre d'andosols caractérisés est de 2. Cet échantillon ne peut donc être considéré comme représentatif, en particulier en raison de la grande différence entre les deux teneurs en ferrihydrite.

Deux facteurs permettent toutefois d'expliquer la diminution observée en AP. Tout d'abord, l'augmentation de la teneur en matière organique exerce un effet diluant sur les teneurs des autres constituants. Ensuite, l'hydromorphie de ces sols peut affecter les teneurs en oxydes de fer par des processus de réduction.

La ferrihydrite est donc corrélée à la classe pédologique de manière très nette. Il s'agit d'un élément déterminant, l'importance de cet élément sur l'agrégation des argiles et donc sur la macroporosité ayant été soulignée au premier chapitre.

#### **Allophane**

La corrélation avec la classe pédologique est ici moins évidente, et de nombreux commentaires doivent être formulés (figure 9).

Nous excluons les AP de notre analyse pour les mêmes raisons que celles invoquées pour la ferrihydrite.

Nous avons déjà signalé la différence entre horizons. Les teneurs inférieures observées en horizon A s'expliquent par la présence importante de matière organique (MO) dans cet horizon. La MO a en effet une forte affinité pour l'aluminium, qui entre également dans la composition des allophanes. Il y a donc compétition pour cet élément, et les teneurs en allophane sont ainsi inférieures dans les horizons organiques.

Les sols BR présentent des teneurs en allophane très faibles, voire nulles. Les BA et AN ont par contre des teneurs moyennes similaires et assez élevées, aux alentours de 10%. Une différence notoire entre ces deux types de sol est à noter au niveau de la variabilité, qui est beaucoup plus importante chez les BA.

L'évolution de la teneur en allophane le long de la séquence n'est donc pas linéaire. Les BR et les AN représentent les deux tendances extrêmes, et les BA sont intermédiaires, avec des valeurs très variables et parfois nettement plus élevées que chez les AN. Ils représentent donc une classe seuil qui peut tantôt être très proche de BR, tantôt présenter des caractères andiques très marqués pour ce paramètre.

La comparaison de nos données avec celles de Dorel *et al* (2000) permet de dégager des similitudes au niveau de l'évolution (tableau 6). En horizon A, les teneurs sont nettement plus faibles qu'en horizon B. Elles sont faibles en BR, élevées et similaires en BA et AN, et diminuent chez les AP. En horizon B, elles sont faibles en BR, intermédiaires en BA et élevées pour les AN et AP.

Si ces teneurs sont en valeur absolue assez différentes des nôtres, leur évolution le long de la topo-séquence est par contre rigoureusement identique. Aucune explication n'est malheureusement donnée quant à cette évolution particulière.

**Tableau 6 : Teneur en allophane des sols de la topo-séquence (Dorel *et al* (2000))**

Sol	Horizon	Allophane [g.kg <sup>-1</sup> ]	
		Dorel	Feltz
Andosol perhydraté	A	30	8.5 ± 5.2
	B	250	16.2 ± 4.4
Andosol	A	90	9.8 ± 1.1
	B	260	13.6 ± 3.7
Sol brun andique	A	80	10.5 ± 7.6
	B	170	11.8 ± 8.2
Sol brun rouille à halloysite	A	<1	<1
	B	<1	<1

Les teneurs en allophane sont donc corrélées aux classes pédologiques, mais de manière non linéaire avec l'altitude. Les BR en sont dépourvus, et les AN ont des teneurs de l'ordre de 10% en horizon A et de 15% en horizon B. Enfin, dans les BA, les teneurs sont très variables, et nous retiendrons que cette classe ne peut être définie sur base de celles-ci.



## Carbone total

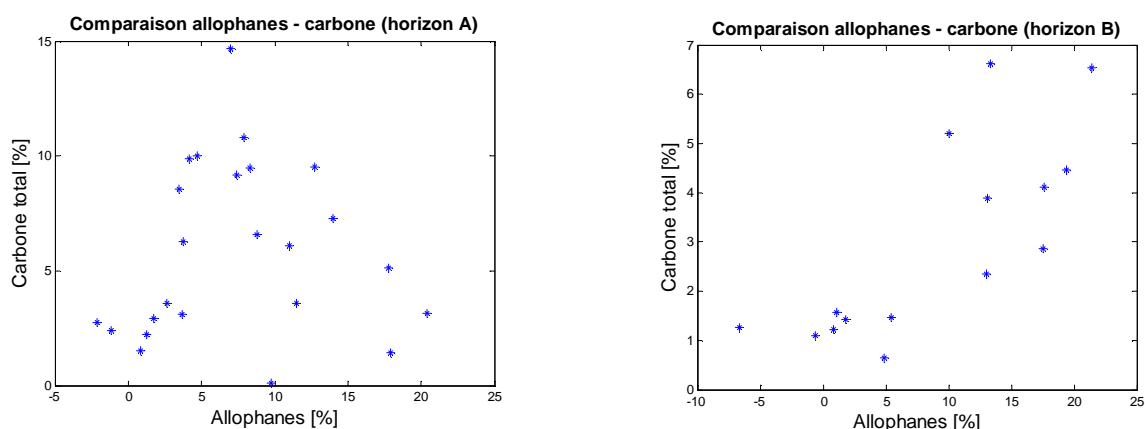
Comme nous l'avons déjà signalé, les teneurs en carbone sont systématiquement plus faibles en horizon B qu'en horizon A, et elles augmentent avec l'altitude, ce qui est tout à fait en accord avec les attentes formulées au premier chapitre (figure 10).

Les sols brun rouille contiennent peu de carbone, et les AP en contiennent énormément. Les valeurs moyennes de 10% de carbone correspondent en effet à 17% de matière organique, ce qui est énorme. Les BA en horizon A ont des teneurs légèrement supérieures au BR.

Les AN et les BA en horizon B ont par contre des variabilités beaucoup plus grandes.

Pour les BA, un des sites caractérisés (sur cinq) présente une teneur en carbone de 1.4% en horizon A et de 6.5% en horizon B. Bien que la mauvaise qualité des photographies disponibles pour ce site ne permette pas de le confirmer, une inversion des deux horizons est donc probablement intervenue lors de la manipulation des échantillons. Il s'agit d'un élément qui permet d'expliquer une part de la variabilité des mesures en horizon B.

Pour les AN, la même explication pourrait être donnée. Un des sites présente en effet des teneurs en carbone inférieures (par rapport à l'horizon B) et exceptionnellement faibles en horizon A (0.12%). Or les photos permettent ici de mettre en évidence les fortes teneurs en matière organique de l'horizon A, et une différence nette avec l'horizon B. Ici aussi, une inversion entre deux échantillons est probablement intervenue et permet d'expliquer une partie de la variabilité de cette classe.



**Figure 19 :** Comparaison entre teneurs en allophane et en carbone en horizons A et B

Enfin, il nous a semblé envisageable de lier la variabilité des AN pour ce paramètre avec celle constatée pour les teneurs en allophane. Effectivement, ces éléments ont un effet stabilisant réciproque et leurs concentrations pourraient donc être corrélées.

La figure 19 montre qu'il n'en est rien en horizon A ( $r^2 = 0.003$ ) mais qu'une relation existe bel et bien en horizon B ( $r^2 = 0.59$ ). La variabilité de la teneur en allophane est cependant limitée en horizon B, et l'explication proposée est donc réfutée.

Les concentrations en carbone et donc en matière organique sont donc corrélées aux classes de sol de manière claire, avec une augmentation depuis les sols BR jusqu'aux AP. Des imprécisions lors de la manipulation de ces échantillons nous empêchent toutefois d'évaluer cette relation avec précision.

## Analyse comparative des moyennes

Une analyse statistique répandue afin de déterminer si deux moyennes peuvent être considérées comme différentes est l'ANOVA. Cette technique permet de comparer les moyennes de deux échantillons au regard de leur variance interne. Cette variance étant a priori assez importante pour nombre de nos sols, il est opportun d'appliquer ce traitement aux données que nous venons de présenter.

Les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel SAS.

Pour les trois paramètres traités, l'effet des classes pédologiques est hautement significatif. Cela confirme donc tout à fait nos observations. De plus, les tendances dégagées au regard des « boxplot » sont confirmées par cette analyse.

L'ANOVA n'apporte pas de nouveaux éléments, mais confirme nos observations. Nous ne détaillerons donc pas plus les résultats obtenus.

## Conclusion

Nous avons mis en lumière la corrélation entre les trois paramètres pédologiques intéressants et les classes pédologiques de la topo-séquence. Au regard de nos données, ces corrélations sont parfois floues mais la prise en compte des imprécisions des protocoles et des erreurs expérimentales permet cependant de les mettre en évidence de manière satisfaisante.

La présence de ferrihydrite est incontestablement liée au type de sol, et ce de manière linéaire.

Le carbone présente des concentrations différentes selon les horizons, mais la corrélation avec la classification pédologique est incontestable. Certaines erreurs de manipulation nous empêchent toutefois de qualifier cette relation avec précision.

Enfin, la teneur en allophane est également corrélée au type de sol, mais de manière non linéaire. Un saut brusque est observé entre les BR et les AN. Ce saut est matérialisé par la variabilité interne importante des BA et il se situerait donc dans la zone topologique de cette classe.

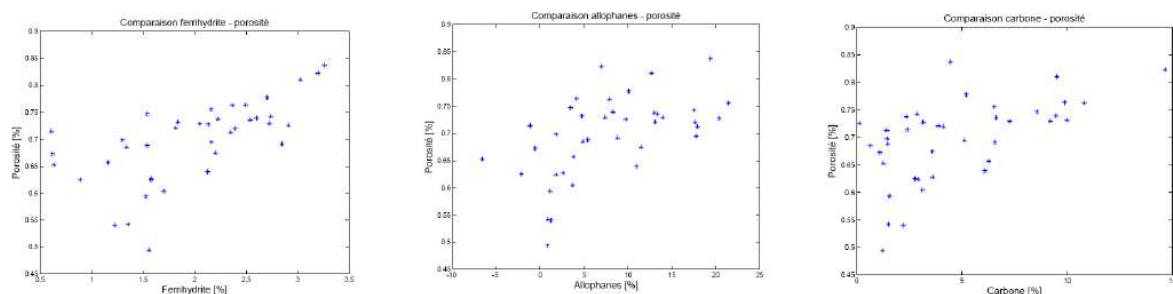
Notre premier objectif est donc atteint. Les paramètres pédologiques permettent bien de discriminer les sols par rapport à la classe pédologique et, à l'inverse, il est possible d'estimer les paramètres pédologiques sur base de cette seule classification.

## Paramètres pédologiques et porosité

Le deuxième objectif de notre étude est de vérifier que la corrélation entre porosité et paramètres pédologiques, démontrée par Dorel *et al* (2000), est effective à une échelle étendue, comme celle à laquelle nous travaillons. Une attention particulière est portée à la macroporosité en raison de son influence sur le comportement hydrodynamique proche de la saturation.

### Porosité

La porosité totale, présentée au chapitre précédent, présente une bonne corrélation avec les classes pédologiques. La figure 20 présente sa relation avec les différents paramètres pédologiques en eux-mêmes.



**Figure 20 :** Comparaison de la porosité avec les teneurs en ferrihydrite ( $r^2=0.41$ ), en allophane ( $r^2=0.31$ ) et en carbone total ( $r^2=0.32$ )

Les coefficients de corrélation, tous supérieurs à 0.3, confirment l'influence de ces paramètres sur la porosité. Exprimés par horizon, ces coefficients indiquent une meilleure corrélation en horizon B (tableau 7).

**Tableau 7 :** Coefficients de détermination par horizon entre porosité et paramètres pédologiques

Coefficient de détermination ( $r^2$ ) avec la porosité		
	Horizon A	Horizon B
<b>Ferrihydrite</b>	0.34	0.45
<b>Allophane</b>	0.18	0.50
<b>Carbone total</b>	0.48	0.39

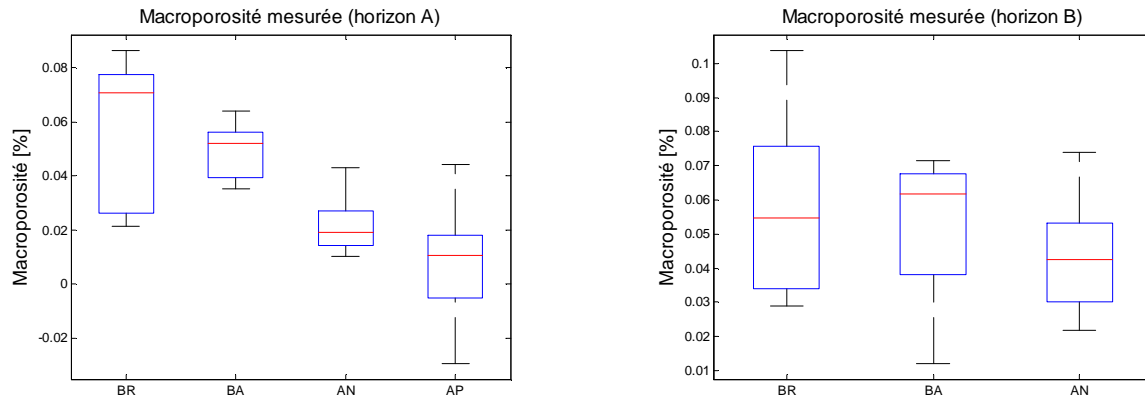
Le rôle de la ferrihydrite semble prépondérant. La corrélation s'améliorant avec l'augmentation de la concentration, cet élément semble favoriser la porosité sans pour autant lui être nécessaire.

## Macroporosité

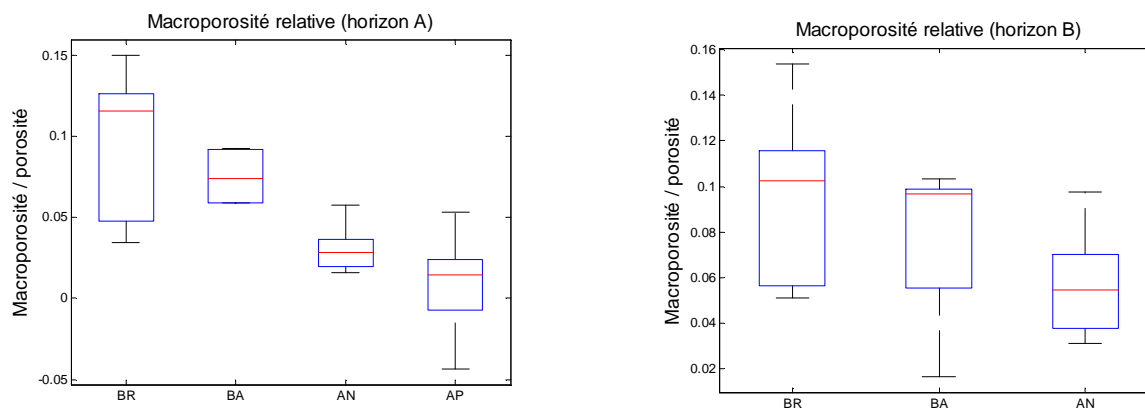
La figure 21 présente les valeurs de macroporosité mesurée pour chacun de nos sols. Elle est ici définie comme étant la différence entre la porosité totale et la teneur en eau à pF 0. Il s'agit donc des pores de diamètre supérieur à 1.5 mm. L'infiltration à saturation s'effectuant, pour certains sols argileux, sous forme de « bypass flow » (Lin *et al*, 1999b), la quantification des pores d'un tel diamètre est donc digne d'intérêt.

Ici, une tendance claire est observée en horizon A. En horizon B, la variabilité interne est supérieure aux différences entre classes et empêche donc toute conclusion.

Il est également important de noter l'ordre de grandeur de ces valeurs. La macroporosité alterne entre 0 et 8 % du volume total, ce qui est énorme. Nos sols sont donc macroporeux, ce qui favorise une infiltration à saturation importante.



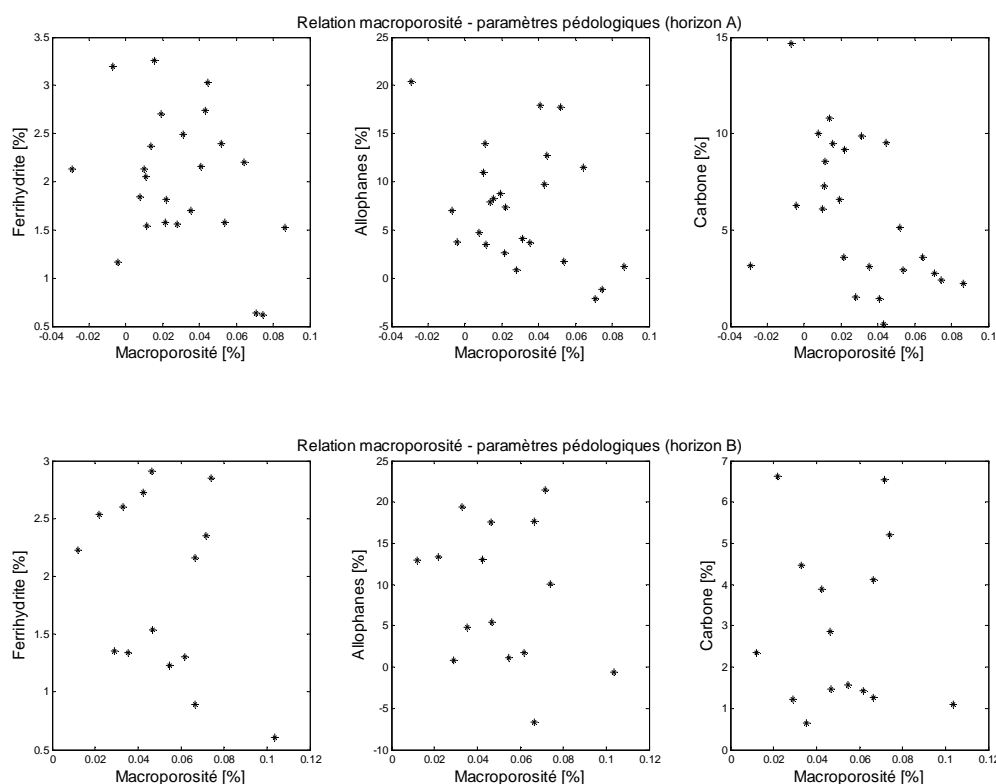
**Figure 21 :** Macroporosité mesurée à partir des valeurs de teneur en eau.



**Figure 22 :** Macroporosité exprimée par rapport à la porosité totale

Exprimer la macroporosité en pourcentage de la porosité totale permet d'obtenir des relations cohérentes avec la classe de sol, et donc avec les paramètres pédologiques, pour les deux horizons (figure 22). La porosité des sols BR est donc plus favorable à l'apparition de « bypass flow », tandis que les AP, bien qu'ayant une porosité totale plus importante, ont proportionnellement moins de macropores, ce qui tend à favoriser des processus d'infiltration « classiques ».

Notons enfin, comme le montre la figure 23, que la macroporosité ne semble pas corrélée aux paramètres pédologiques. Cette observation est surprenante, en particulier en horizon A, où la macroporosité est pourtant corrélée à la classe pédologique.



**Figure 23 :** Relations entre paramètres pédologiques (teneurs en ferrihydrite, allophane et carbone) et macroporosité

## Conclusion

La porosité totale est indéniablement corrélée aux paramètres pédologiques. Cette conclusion, déjà établie par Dorel *et al* (2000), reste valable à l'échelle plus large à laquelle nous travaillons.

Cette corrélation est toutefois moins directe, et nous n'avons pu mettre en évidence une combinaison de paramètres qui nous permettrait de prédire avec précision la porosité, comme Dorel et Roger – Estrade l'ont proposé (1997).

La macroporosité est conséquente dans tous nos sols. La proportion de macroporosité par rapport à la porosité totale nous permet de discriminer nos sols à partir des paramètres pédologiques. Cette macroporosité est importante chez les BR et BA, et diminue fortement chez les AN et AP, en particulier en horizon A.

Cette macroporosité supérieure en BR en horizon A est à mettre en lien avec la résistance de ces sols à la compaction, plus importante que celle des AN (Dorel *et al*, 2000).

## Porosité et comportement hydraulique

Le troisième objectif de ce travail est d'établir le lien entre porosité et comportement hydraulique. Nous commencerons par revenir sur la macroporosité en essayant de trouver un indicateur valable de la macroporosité à partir des données hydrauliques. Nous travaillerons ensuite en deux temps, traitant séparément les paramètres hydrostatiques et hydrodynamiques.

### Macroporosité

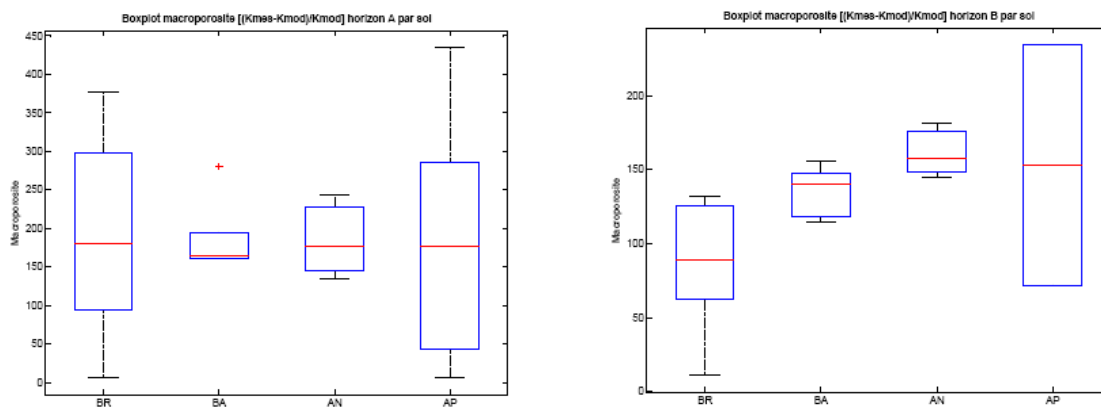
Trois indicateurs créés selon des logiques différentes seront utilisés. Les deux premiers sont basés sur la différence entre les valeurs d'infiltration mesurées (avec l'infiltromètre et le double anneau) et modélisées. Le troisième est quant à lui basé sur la différence d'infiltration à des suctions de -3 et 0 cm (Lin *et al.*, 1999b).

Le premier indicateur est calculé par la formule suivante :

$$\text{macroporosité} = \frac{I_{\text{mes}} - K_{\text{mod}}}{K_{\text{mod}}}$$

avec  $I_{\text{mes}}$  = valeurs d'infiltration [cm/h] mesurées à  $h=0$  avec l'infiltromètre ou au double anneau,  $K_{\text{mod}}$  = paramètre  $K_{\text{sat}}$  [cm/h] de l'équation de Gardner.

Le principe est le suivant : considérant que la courbe  $K-h$  d'un sol moyennement structuré est de type exponentiel, le  $I_{\text{mes}}$  est supérieur au  $K_{\text{mod}}$  pour un sol très structuré, et inversement. La différence entre ces deux valeurs nous renseigne donc sur l'état de structuration du sol, qui détermine la porosité. Les résultats obtenus pour cet indicateur sont présentés aux figures 24 et 25.



**Figure 24 :** Macroporosité modélisée  $[(I_{\text{mes}}-K_{\text{mod}})/K_{\text{mod}}]$  pour les horizons A (gauche) et B (droite) à partir de l'infiltration mesurée à  $h = 0$  cm

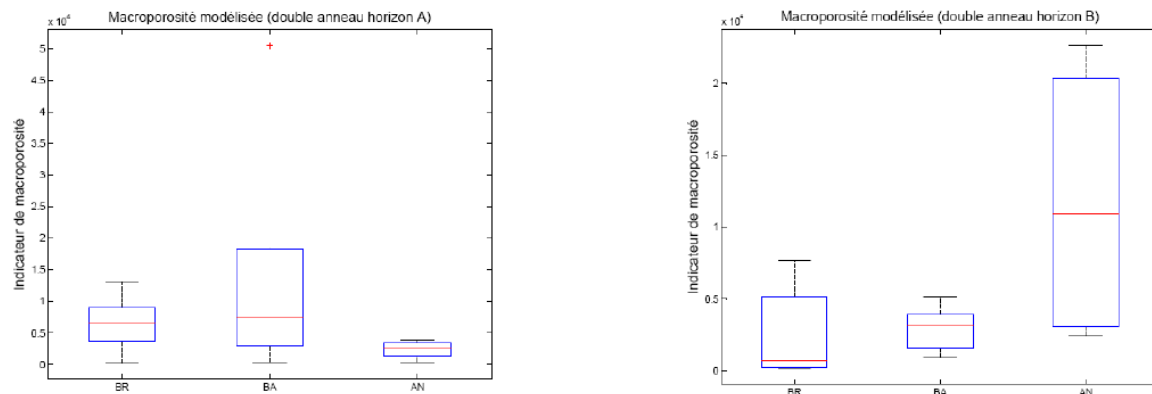
Nous observons ici la grande variabilité des sols BR, ainsi que celle des AP. En horizon A, aucune tendance n'est observable, les valeurs moyennes de macroporosité étant pour ainsi dire identiques. En horizon B par contre, une légère tendance est observable, avec un estimateur plus faible pour les sols BR et un peu plus élevé pour les AN et AP. Ceci

indiquerait une légère augmentation de la structuration avec l'altitude ( $r^2=0.28$  pour l'horizon B pour une régression linéaire).

Cette tendance est contradictoire avec la macroporosité mesurée, qui est plus importante en bas de séquence, en particulier en horizon A.

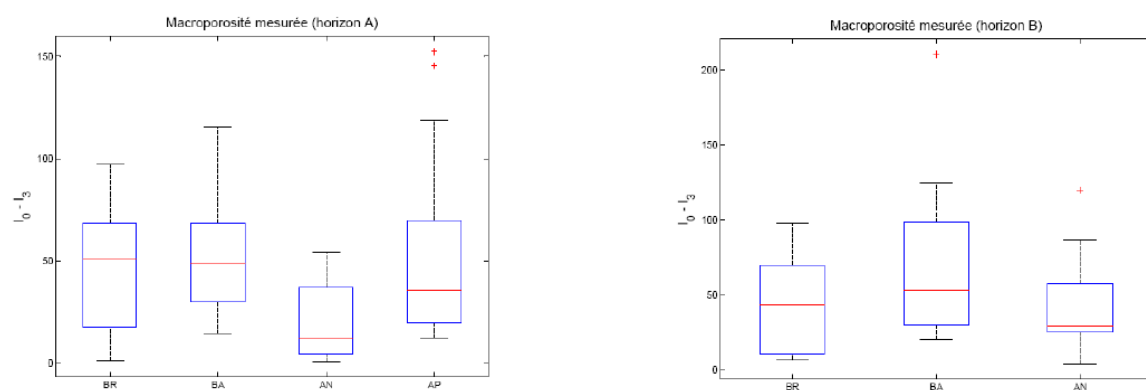
Le même indicateur fut calculé en utilisant les valeurs d'infiltration mesurées au double anneau. Les conclusions sont les mêmes : en horizon A, les différences entre types de sol sont nulles et une légère tendance à l'augmentation avec l'altitude est observable en horizon B.

Ces deux premiers indicateurs ne présentent donc pas de résultats satisfaisants.



**Figure 25 :** Macroporosité modélisée  $[(I_{mes}-K_{mod})/K_{mod}]$  à partir de l'infiltration mesurée au double anneau

Le troisième indicateur utilisé est simplement la différence entre les valeurs d'infiltration mesurées aux suctions 0 et -3 cm (figure 26). L'idée est de considérer les macropores comme étant de diamètre supérieur à 500  $\mu m$  (diamètre maximal concerné par l'infiltration à  $h = -3$  cm). La différence d'infiltration entre les deux suctions suscitées représente donc l'infiltration macroporale et est, à ce titre, un bon indicateur de la macroporosité (Lin *et al*, 1999b).



**Figure 26 :** Macroporosité mesurée par différence entre  $I_{(h=0cm)}$  et  $I_{(h=-3cm)}$

La première observation concerne la variabilité interne aux types de sol. Quel que soit le sol, cette variabilité est nettement supérieure à la variabilité entre groupes, dont les moyennes ne semblent pas sensiblement différentes, excepté peut-être pour les AN en horizon A. Il semble

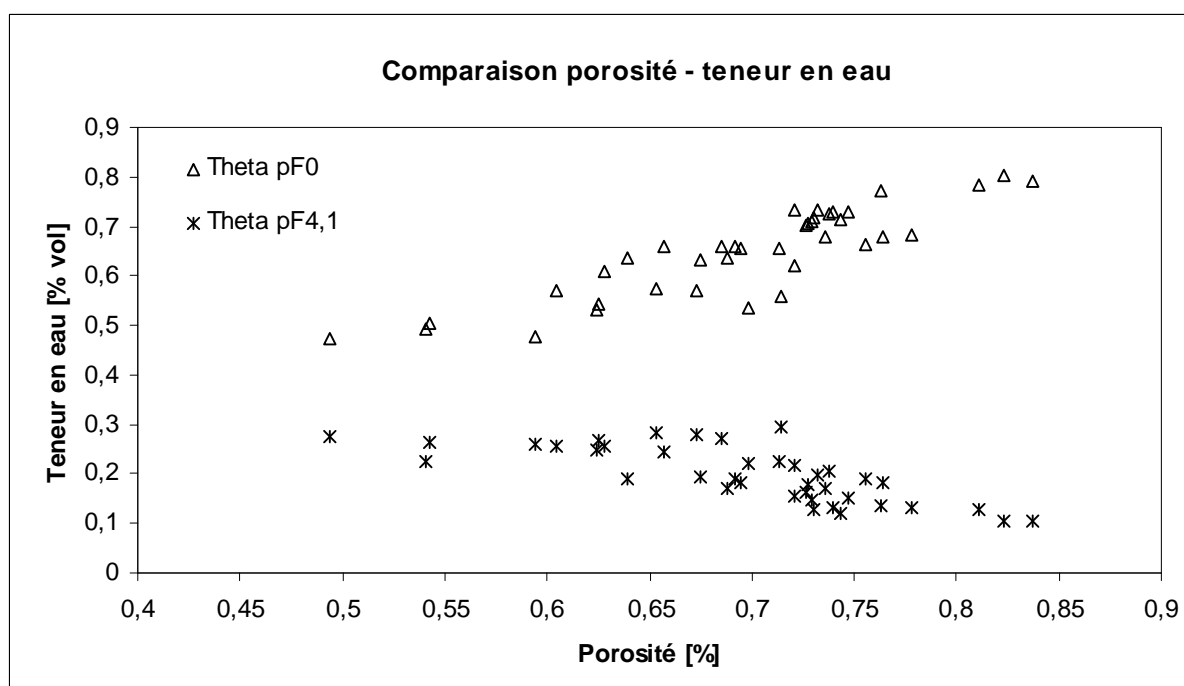


dès lors difficile d'utiliser cet indicateur comme base de comparaison avec les paramètres pédologiques.<sup>8</sup>

Aucun des trois indicateurs proposés ne montre de relation valable avec la macroporosité mesurée. Il conviendra donc de vérifier le lien entre macroporosité et comportement hydraulique au cours des analyses suivantes.

## Hydrostatique

La figure 27 présente les valeurs de teneurs en eau mesurées aux deux succions extrêmes (pF 0 et pF 4.1) par rapport à la porosité totale. La corrélation est évidente, avec une augmentation de la teneur en eau à pF 0 avec la porosité, et une diminution de la teneur en eau à pF 4.1.



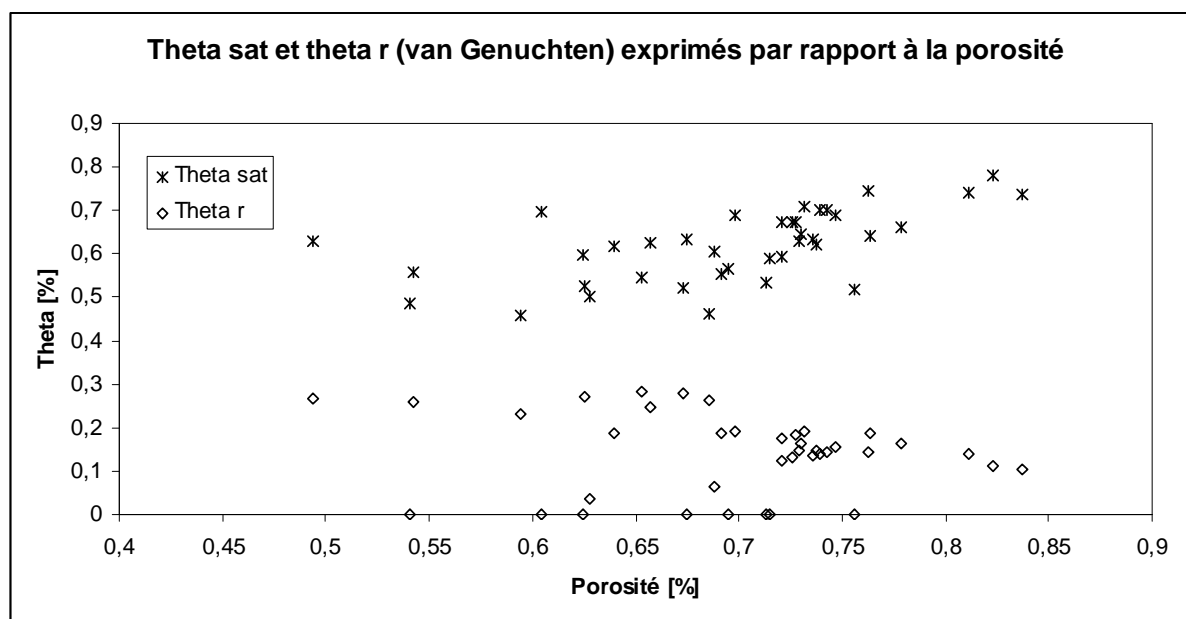
**Figure 27 :** Comparaison entre porosité et teneurs en eau à pF 0 et 4.1

Cette affirmation est confirmée par les coefficients de détermination ( $r^2$ ), qui sont de 0.77 pour  $\theta_0$  et de 0.56 pour  $\theta_{4.1}$ .

L'impact de la porosité totale sur la teneur en eau proche de la saturation est évident. Les plus faibles teneurs en eau à pF 4.2 des sols à forte porosité nous indiquent que ces sols ont de plus faibles teneurs en argile granulométrique.

Les sols à faible porosité ont donc des teneurs en eau à pF 4.1 importantes et contiennent donc une grande proportion d'argile granulométrique, et inversement. Ceci indique que les sols du bas de la topo-séquence ont un comportement hydrostatique argileux et que les sols d'altitude se comportent comme des sols sableux.

<sup>8</sup> Les différences entre  $I_0$  et toutes les autres succions mesurées furent testées mais, aucune ne présentant de corrélation significative, nous ne les présenterons pas dans le cadre de ce travail.



**Figure 28 :** Paramètres  $\theta_{sat}$  et  $\theta_r$  de l'équation de van Genuchten exprimés par rapport à la porosité totale

La figure 28 présente les paramètres de l'équation de van Genuchten par rapport à la porosité. Ils ont l'avantage de représenter l'allure complète de la courbe de rétention et non uniquement les valeurs extrêmes de cette courbe.

Leur corrélation avec la porosité est floue. Au regard des coefficients de détermination ( $r^2=0.33$  pour  $\theta_{sat}$ , 0.02 pour  $\theta_r$ , et 0.21 pour  $n$  et 0.01 pour  $\alpha$ , non représentés), de vagues influences existent pour  $\theta_{sat}$ , qui représente la teneur en eau à saturation.

Nous avons suggéré le pouvoir discriminant du paramètre  $n$  par rapport au type de sol lors de la présentation des courbes de rétention. La figure 14 montre qu'il ne permet pas de discriminer chaque classe de sols mais qu'il permet de faire distinctement la différence entre les sols de faible et de haute altitude.

Ceci explique que nous ne retrouvons pas cet effet par rapport à la porosité, la progression de cette dernière le long de la topo-séquence étant plus graduelle.

Notons que le paramètre  $n$  est un bon indicateur de la distribution des pores. Une valeur élevée de ce paramètre indique une diminution brusque de la teneur en eau, qui reflète une distribution des pores irrégulière (AN et AP). A l'inverse, une faible valeur de  $n$  traduit l'existence d'une large gamme de diamètres de pores (BR et BA).

Les paramètres hydrostatiques sont donc liés à la porosité sans pour autant lui être corrélés. Le lien avec les teneurs en eau à pF 0 et 4.1 est clair mais disparaît lors de la modélisation des courbes de rétention.

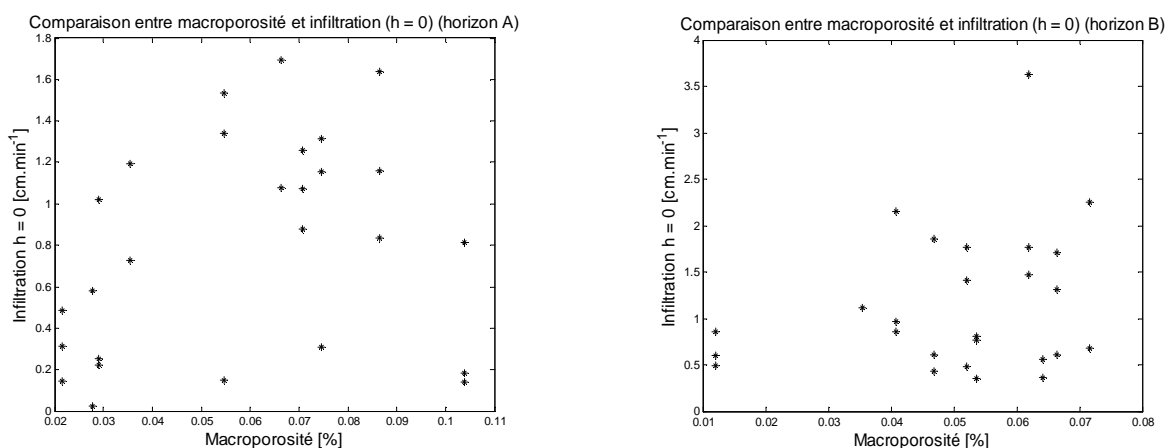
Le paramètre  $n$  permet de faire une distinction claire entre haut et bas de la topo-séquence, mais son évolution est brutale et il n'est donc pas corrélé à la porosité.

## Hydrodynamique

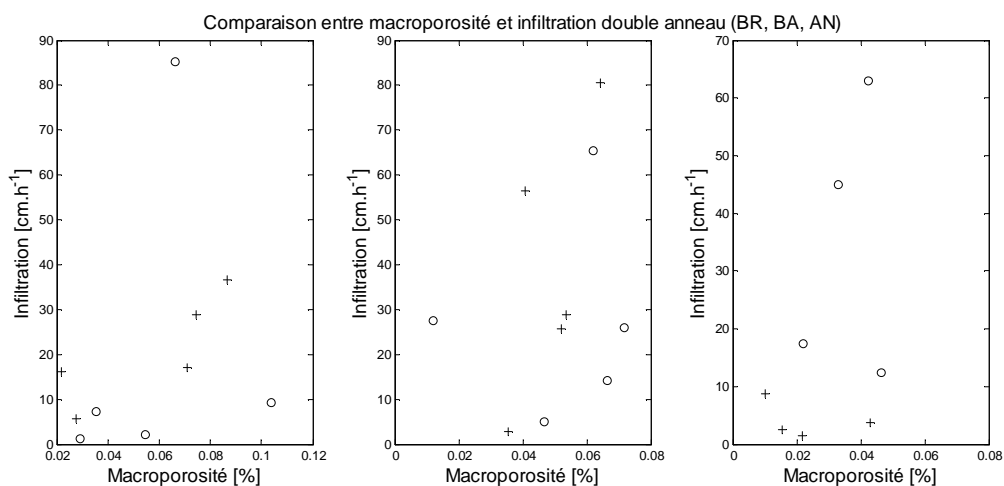
Les figures 29 et 30 illustrent l'absence de corrélation entre l'infiltration mesurée et la macroporosité.

Ce résultat corrobore les observations formulées lors de la description des résultats. Le comportement hydrodynamique des sols étudiés semble donc n'être corrélé à aucun des autres paramètres mesurés, que ce soit à la macroporosité, comme nous venons de le montrer, ou aux classes de sol.

La seule tendance observée, entre  $K_{sat}$  et la classe pédologique en horizon B, ne se reflète pas par rapport à la macroporosité.



**Figure 29 :** Comparaison entre macroporosité mesurée et infiltration à h = 0 cm



**Figure 30 :** Comparaison entre macroporosité mesurée et infiltration déterminée au double anneau ("+" = horizon A, "o" = horizon B)

Enfin, nous avons souligné l'absence de corrélation entre les valeurs d'infiltration mesurées à h = 0 avec l'infiltromètre et celles obtenues à l'aide du double anneau. Le double anneau permet de mesurer l'infiltration à saturation. L'eau gravitaire, qui traverse les pores de large

diamètre tels les trous d'animaux et les fissures, est donc prise en compte. Ce n'est pas le cas avec l'infiltromètre à succion, qui ne mesure que l'infiltration « matricielle ». Cette distinction permet d'expliquer l'absence de relation entre ces mesures.

## **Classes pédologiques et comportement hydraulique**

Les trois premiers objectifs ont maintenant été traités.

Nous avons confirmé la relation entre classification et paramètres pédologiques. Nous avons ensuite étendu les conclusions de Dorel *et al* (2000) en validant la corrélation entre paramètres pédologiques et porosité totale à l'échelle de la topo-séquence ; cette relation devient moins évidente si l'on considère uniquement la macroporosité. Nous avons enfin mis en évidence la corrélation entre porosité et courbe de rétention, mais il s'est avéré impossible de faire de même pour la courbe de conductivité.

Le dernier objectif de ce travail consiste à évaluer la relation entre classes pédologiques et comportement hydraulique. Ceci devrait être possible pour la courbe de rétention, puisque toutes les étapes intermédiaires sont concluantes, mais devrait s'avérer difficile pour les courbes de conductivité.

Pour parvenir à notre objectif, nous utilisons plusieurs analyses statistiques qui nous permettent de visualiser de manière plus claire et plus complète la distribution de nos sols et l'importance des différentes variables considérées.

### ***Analyse comparative des moyennes***

---

Pour cette analyse, chaque site a été défini par rapport à la classe de sol à laquelle il appartient. Il est en effet nécessaire de définir des groupes auxquels rattacher les données afin de pouvoir calculer moyennes et variances entre groupes et au sein de chaque groupe pour pouvoir les comparer.

Cette analyse, qui permet de déterminer si des moyennes sont statistiquement différentes, a été réalisée sur les paramètres hydrodynamiques. Les variables considérées par cette analyse sont l'horizon, A ou B, et la classe de sol, BR, BA, AN ou AP.

### **Infiltration**

L'ANOVA fut d'abord effectuée sur les valeurs d'infiltration mesurées (figure 16). Pour l'infiltration mesurée à  $h = -10$  et  $h = -6$  cm, les conclusions sont identiques : seul le sol a un effet significatif, par opposition à l'horizon. Les sols BA se détachent nettement tandis que les trois autres classes sont confondues. A  $h = -3$  et  $-1$  cm, les conclusions restent identiques, mais le rôle de l'horizon est plus perceptible. Enfin, à  $h = 0$  cm, le rôle de l'horizon disparaît complètement, et même le rôle du sol se fait moins perceptible. Une fois encore, seuls les BA se détachent, mais de manière moins nette par rapport aux BR.

Cette analyse permet donc de conclure à un effet réel de la classe pédologique, mais cet effet ne permet d'isoler qu'une seule classe, les BA.

## Courbe de conductivité

La même analyse fut appliquée aux paramètres de l'équation de Gardner obtenus à partir des données d'infiltration. Comme nous l'avons déjà signalé, ces paramètres ont été déterminés pour chaque site, mais aussi pour chaque répétition<sup>9</sup>. L'ANOVA a été effectuée sur les deux types de données.

Les moyennes des valeurs de  $K_{sat}$  déterminés « par répétition » à partir de l'équation de Gardner ne présentent pas de différences significatives, tandis que le paramètre  $\alpha$  est significativement différent en fonction de la classe de sol.

Envisager chaque type de sol individuellement par rapport aux autres permet de se faire une idée plus précise en évaluant l'effet combiné des deux paramètres. Les valeurs obtenues pour les sols BR s'avèrent différentes de celles des trois autres types de sol (différence des moyennes hautement significative,  $\alpha_{ANOVA} < 0.01$ ). Les sols BA sont eux aussi différents (différence des moyennes significative,  $0.05 > \alpha_{ANOVA} > 0.01$ ). Les AN et AP ne sont quant à eux absolument pas différents ( $\alpha_{ANOVA} > 0.05$ ).

Les mêmes analyses ont été appliquées aux paramètres calculés « par site ». Aucune différence significative de quelque type que ce soit n'est observable pour ces données.

Les paramètres de l'équation de Gardner permettent donc de mettre en lumière de légères différences entre classes de sol au niveau du comportement hydrodynamique lorsqu'ils sont envisagés « par répétition ». Une fois ces répétitions combinées pour obtenir des valeurs uniques par site, plus aucune tendance n'est observable et les paramètres des différentes classes de sol sont alors considérés comme similaires.

## Conclusion

Cette analyse nous indique donc que la classe pédologique détermine le comportement hydrodynamique du sol. Cet effet est cependant mineur, et seuls les sols BA se démarquent valablement.

Toute distinction disparaît toutefois lorsque les résultats sont envisagés « par site », ce qui indiquerait que la variabilité à l'échelle de la parcelle est supérieure à la variabilité entre parcelles de même classe pédologique.

Des analyses supplémentaires s'avèrent donc nécessaires.

---

<sup>9</sup> Nous utiliserons dans cette partie la terminologie suivante : « données – mesures *par répétition* » et « données – mesures *par site* ». Cette dernière expression indique que les différentes répétitions effectuées sur le même horizon d'une même parcelle ont été combinées pour obtenir une valeur unique. Pour chaque parcelle caractérisée, il y a donc une caractérisation *par site* en horizon A et une autre en horizon B.

## **Analyse en composantes principales**

---

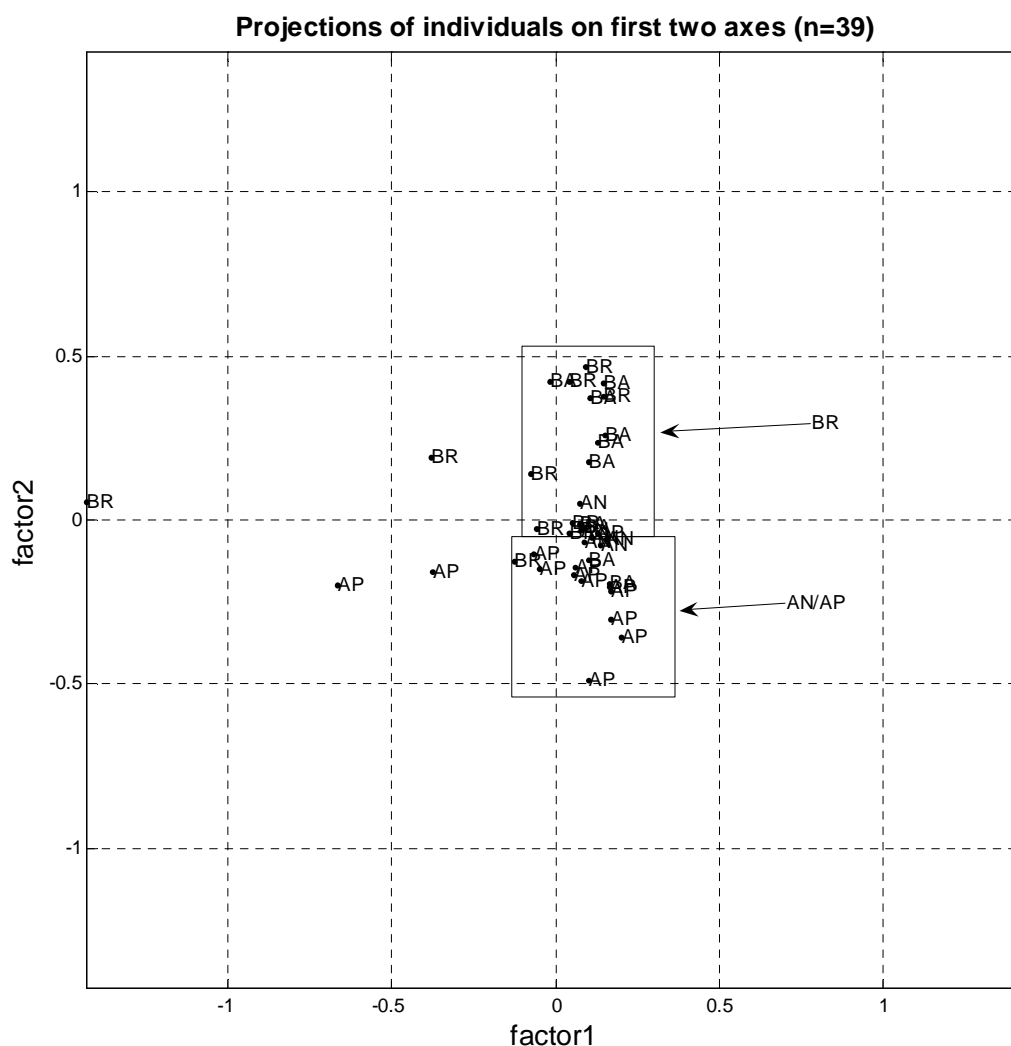
L'analyse en composantes principales (ACP) permet de définir des combinaisons linéaires de variables afin de résumer l'information initiale en un nombre plus réduit de variables. Ces combinaisons linéaires, les « composantes principales », sont mutuellement orthogonales, l'orthogonalité étant l'équivalent géométrique de l'indépendance. L'ACP est fréquemment utilisée en analyse multivariée.

L'ACP sélectionne en outre les combinaisons de variables qui présentent la plus grande variance, de manière à visualiser les échantillons de la manière la plus claire possible. Les résultats présentés ont été obtenus à l'aide du logiciel MATLAB.

L'intérêt de cette analyse est double. Elle permet tout d'abord de visualiser graphiquement dans quelle mesure les sites caractérisés s'organisent ou non par classe de sol. Ensuite, en étudiant le poids des différents paramètres sur les axes de projection sélectionnés, il est possible d'en déduire les variables permettant de différencier les données. Cette analyse doit toujours être effectuée en lien avec la projection en elle-même.

Notons enfin que l'analyse ici présentée est effectuée sur un jeu de données centrées et réduites, ce qui signifie que leur moyenne est ramenée à 0 et leur variance à 1. Cette transformation permet d'éliminer les biais dus aux différences d'unités, d'ordre de grandeur et de variance entre les différentes variables.

L'ACP ici présentée a été réalisée à partir des données « par site » et combine les paramètres des équations de van Genuchten et de Gardner. Ces derniers furent déterminés en prenant en compte l'infiltration aux suctions -10, -6, -3, -1 et 0 et une seconde fois en ne prenant pas en compte  $h = 0$  cm. Les figures 31 et 32 présentent la projection des échantillons sur les deux axes les plus discriminants et la projection des variables en fonction de leur poids dans le calcul de ces axes.



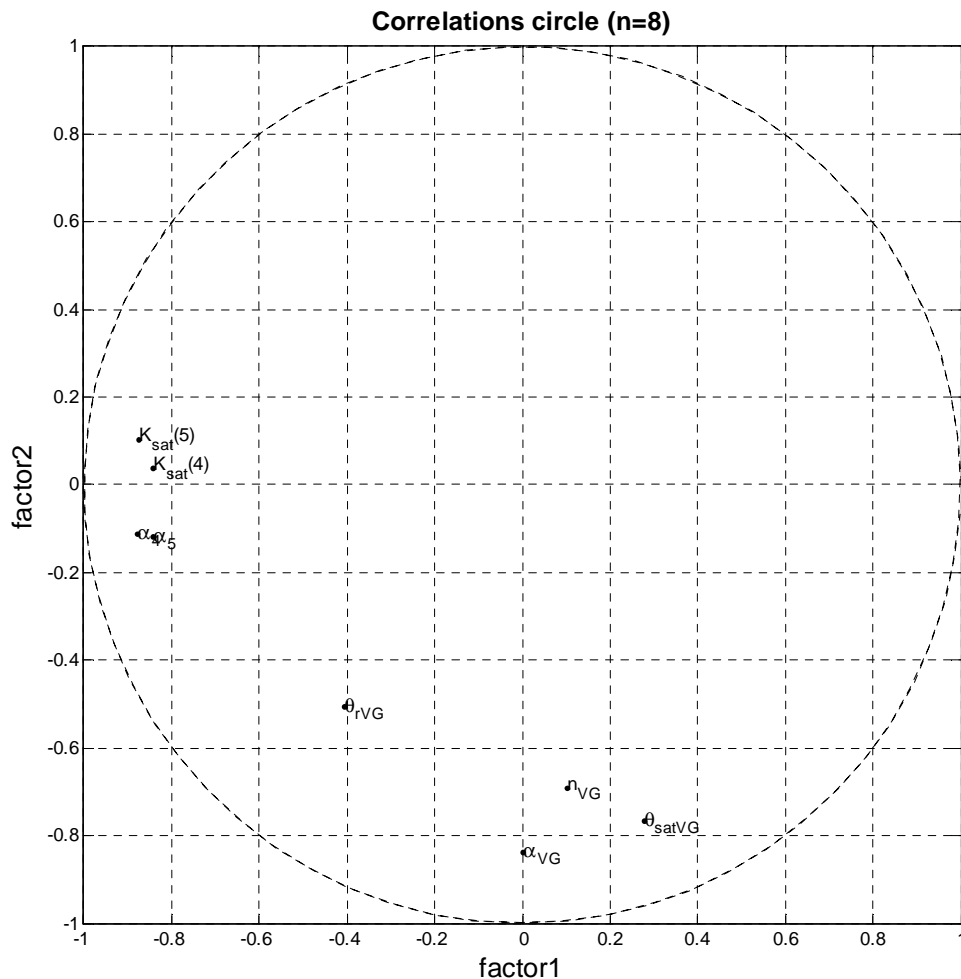
**Figure 31 :** Projection des sites dans le plan des deux premières composantes principales

L'axe 1 reproduit à lui seul 40% de la variance totale des données, et l'axe 2 en reproduit 26%. Notre projection représente donc 66% de la variance totale et peut être qualifiée de moyenne (le seuil classiquement utilisé pour une « bonne » représentation étant de 70% pour les deux premiers axes).

La première observation est que les sites sont très concentrés, hormis quelques exceptions (deux BR et deux AP). En regardant plus attentivement, on constate que la plupart des sites BR sont concentrés dans le rectangle supérieur (BR) et que la plupart des AN et AP se retrouvent dans le rectangle inférieur (AN/AP). Les BA sont quant à eux répartis entre ces deux rectangles, majoritairement dans le BR. Aucune distinction entre classes de sol n'est possible le long de l'axe 1 (abscisse), pourtant axe de plus grande variance.

L'examen des composantes de ces axes de projection nous donnera de précieuses informations : les composantes de l'axe 1 confèrent aux échantillons une grande variance mais ne permettent pas de les discriminer par classe de sol, au contraire de ceux de l'axe 2, qui reproduisent par contre une variance moindre.





**Figure 32 :** Cercle de corrélation des variables hydrodynamiques pour l'ACP

Cette figure reprend les huit variables qui interviennent dans l'ACP. La distance par rapport au centre du cercle représente le poids de ces variables dans la détermination des composantes principales ; en abscisse pour la composante 1 (CP1), en ordonnée pour la composante 2 (CP2). Le signe positif ou négatif indique dans quel sens interviennent ces variables.

On observe que les différents paramètres des équations de Gardner jouent un rôle prépondérant sur la CP1, alors que celui des paramètres de van Genuchten est nul. Ce sont donc les variables de Gardner qui confèrent la plus grande variance mais, comme nous l'avons déjà signalé plus haut, elles ne permettent pas de discriminer les échantillons en classes pédologiques.

Les paramètres de l'équation de van Genuchten sont déterminants pour la CP2. Les valeurs de  $\theta_{sat}$ ,  $\alpha$  et  $n$  y jouent un rôle très important.  $\theta_r$  pèse également sur la dispersion le long de l'axe 2, mais dans une moindre mesure. Enfin, le poids des paramètres de Gardner est négligeable.

La distribution verticale des sols, avec les BR en haut et les AN et AP en bas, comparée au signe négatif du poids de  $\theta_{sat}$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  et  $n$ , nous permet de conclure au rôle important de ces paramètres dans l'optique d'une approche comparative entre classe de sol et comportement

hydraulique. Le bas de la séquence (BR) aurait donc des valeurs faibles des paramètres concernés, à l'inverse des sols situés en haut de la séquence (AN et AP). Les sols BA auraient des valeurs ne se trouvant pas entre les deux, comme pourrait le laisser supposer leur situation topographique intermédiaire, mais bien réparties dans toute la gamme de variation.

Ces conclusions sont confirmées par un retour à la présentation de ces paramètres sous forme de « boxplot » (figure 14).  $\theta_{sat}$  suit cette tendance de manière très claire,  $\theta_r$  en horizon B également, mais dans une moindre mesure, ce qui est cohérent avec le poids plus faible de cette variable. Le rôle de  $\alpha$  est vérifié en horizon A, mais les valeurs de ce paramètre en horizon B ne concordent pas avec son rôle prépondérant pour la projection. Enfin, le rôle de  $n$  est cohérent avec les observations formulées plus haut, lors de la discussion du troisième objectif.

La tendance de  $K_{sat}$  à être lui aussi corrélé à la séquence en horizon B ne trouve quant à elle pas confirmation dans cette analyse. Cette tendance apparaît toutefois si l'ACP est réalisée sur les seuls horizons B.

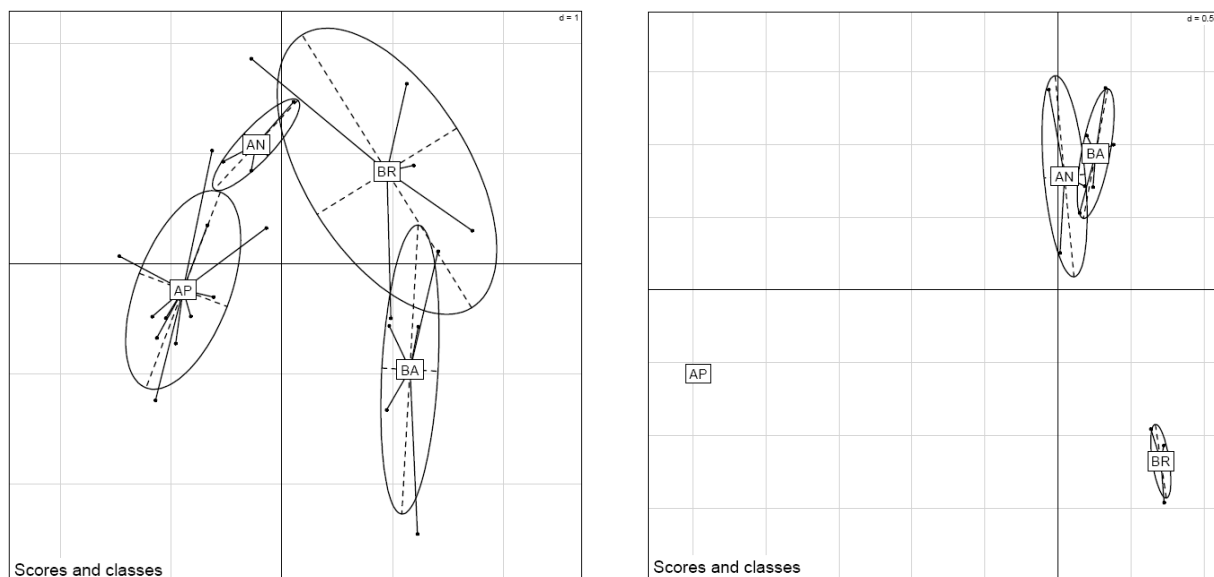
A cette exception près, nos observations initiales sont donc ici confirmées.

Une dernière remarque à formuler concerne la distribution des variables. On constate que, si les paramètres de l'équation de van Genuchten sont relativement indépendants, les paramètres de l'équation de Gardner sont très groupés et pourraient donc présenter une forte corrélation entre eux. Nous reviendrons sur cet aspect au point suivant.

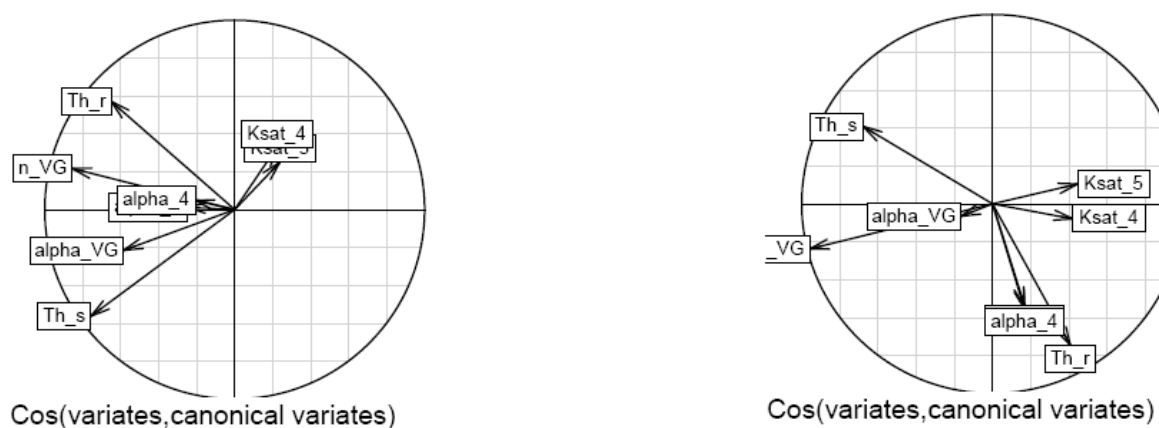
## Analyse factorielle discriminante

L'analyse factorielle discriminante (FDA) repose sur le même principe que l'ACP, à ceci près qu'elle sélectionne comme axe de projection l'axe le plus discriminant compte tenu de groupes prédéfinis. Cette analyse est donc recommandée lorsqu'on connaît les groupes auxquels appartiennent les échantillons et qu'on cherche à voir à la fois la manière dont les groupes se retrouvent au regard de certaines variables et les variables qui permettent de discriminer l'échantillon total en lien avec ces groupes. Ce procédé est donc ici tout à fait indiqué.

Les résultats présentés aux figures 33 et 34 ont été obtenus à l'aide du logiciel R. Les données sources sont une fois encore les paramètres des équations de Gardner et de van Genuchten exprimés « par site ».



**Figure 33 :** Projections de la FDA par type de sol à partir des données hydrodynamiques pour les horizons A (gauche) et B (droite)



**Figure 34 :** Cercles de corrélation des variables hydrodynamiques pour la FDA des horizons A (gauche) et B (droite)

De manière générale, les groupes sont assez distincts. Les BA et AN recoupent les BR sur une surface très réduite en horizon A, mais les BA et AN sont concentrés en horizon B. Les résultats sont globalement concluants.

Observons maintenant dans quelle mesure les différentes variables pèsent sur ces projections.

La différence de projection en fonction des horizons considérés impose un traitement séparé pour chacun d'entre eux. Nous commencerons donc par l'horizon A, puis par le B, avant de nous pencher sur les corrélations entre variables. Nous concluons enfin en synthétisant ces trois parties.

## Horizon A

Comme nous l'avons déjà signalé, les quatre classes pédologiques se retrouvent de manière assez distincte sur cette projection. Les conclusions suivantes sont tirées de la comparaison entre la projection et le cercle de corrélation correspondant.

Les AP sont essentiellement caractérisés par des valeurs de  $\alpha_{\text{Gardner}}$  élevées. Les paramètres de l'équation de van Genuchten sont également importants dans cette classe. Les AN se démarquent quant à eux par leurs  $\theta_r$  et  $n$  élevés. Les sols BA, à l'opposé, sont différenciés par les valeurs faibles de ces  $\theta_r$  et  $n$ . Enfin, les sols BR sont principalement définis par leur  $K_{\text{sat}}$  élevé, et par leurs  $\theta_{\text{sat}}$  et  $\alpha_{\text{VG}}$  faibles.

Toutes ces tendances sont cohérentes avec la présentation des données sous forme de « boxplot ».

## Horizon B

Pour cet horizon, les AP et les sols BR sont bien différenciés. Les AN et les sols BA sont par contre proches. Les tendances générales sont les suivantes.

Les AP sont caractérisés par des valeurs de  $n$  et de  $\alpha_{\text{VG}}$  particulièrement élevées, et un  $K_{\text{sat}}$  faible. A l'opposé, les AN et les sols BA présentent des  $\alpha_{\text{VG}}$ ,  $n$ ,  $\alpha_{\text{Gardner}}$  et  $\theta_r$  faibles. Enfin, les sols BR sont définis par des valeurs de  $\theta_r$  et  $\alpha_{\text{Gardner}}$  élevées, et de  $\theta_{\text{sat}}$  faibles.

Ici aussi, ces observations sont tout à fait cohérentes avec les « boxplot » présentés en début de chapitre.

## Variables

La disposition des variables au sein du cercle de corrélation donne des pistes concernant d'éventuelles corrélations entre elles. Au premier coup d'œil, deux paires de variables se détachent :  $\alpha_4$  et  $\alpha_5$  d'une part, et  $K_{\text{sat}}(4)$  et  $K_{\text{sat}}(5)$  d'autre part. Ces deux paires sont d'ailleurs presque confondues à la figure 34. Nous n'avons d'ailleurs jamais opéré de distinction au sein de ces paires au cours de nos analyses.

Ces variables sont donc intimement corrélées. Cela est logique et même heureux, puisqu'il s'agit des mêmes paramètres de la même équation (équation de Gardner) calculés d'un côté

en prenant en compte toutes les mesures disponibles (indice 5) et, d'un autre côté, sans prendre en compte la conductivité pour  $h = 0$  cm (indice 4).

Les quatre paramètres de l'équation de van Genuchten apparaissent quant à eux relativement indépendants.

Ces conclusions sont assez proches de celles tirées au regard du cercle de corrélation de l'ACP, et nous les considérerons donc comme acquises.

## Conclusion

En combinant les observations relatives aux deux horizons, il est possible de déterminer des paramètres discriminants en fonction des classes pédologiques pour la plupart d'entre elles.

Les AP seraient caractérisés par des  $n$  et  $\alpha_{VG}$  élevés, ce qui indique des pores de larges diamètres et une distribution porale hétérogène.

Les AN seraient quant à eux assez variables, et aucun paramètre ne permet de les différencier valablement.

Les sols BA se distingueraient par de faibles  $\theta_r$  et  $n$ .

Les sols BR, quant à eux, sont caractérisés par des valeurs de  $\theta_{sat}$  particulièrement faibles par rapport aux autres classes de sol.

Cette analyse nous a donc permis de dégager un certain nombre de paramètres dont la valeur nous permet de présumer de la classe pédologique à laquelle appartient le sol concerné.

## Conclusion

Les objectifs de cette étude étaient les suivants : tout d'abord, vérifier la corrélation entre classification et paramètres pédologiques ; ensuite, démontrer l'influence des paramètres pédologiques sur la porosité à l'échelle de la topo-séquence ; enfin, établir une relation entre porosité et comportement hydraulique.

Ces étapes devaient nous permettre de rencontrer l'objectif final, à savoir estimer le comportement hydraulique des sols de la topo-séquence sur base de la classification pédologique.

La première étape fut aisément accomplie en prenant en compte les erreurs inhérentes à la manipulation d'échantillons. La deuxième étape fut en partie résolue, le lien avec la porosité étant clairement établi mais les relations entre macroporosité et paramètres pédologiques étant plus floues. La troisième est divisée en deux volets : le premier, concernant les propriétés hydrostatiques, fut facilement démontré ; le second, consacré aux propriétés hydrodynamiques, reste moins clair.

Afin de synthétiser ces trois étapes pour parvenir à l'objectif final, plusieurs analyses statistiques furent réalisées : ANOVA, ACP et FDA. Même si plusieurs points restent à éclaircir, les résultats montrent des avancées notoires.

Les tableaux 8 et 9 récapitulent les nombreuses observations et conclusions élaborées tout au long de ce travail.

**Tableau 8 : Rappel des tendances observées en horizon A pour les paramètres mesurés<sup>10</sup>**

		<b>Brun rouille</b>	<b>Brun andique</b>	<b>Andosols</b>	<b>Andosols perhydratés</b>
	<b>Altitude [m]</b>	15 - 60	80 - 110	200 - 300	> 300
	<b>Pluviométrie [mm/an]</b>	2500- 2700	2800-3000	3500-4000	> 4000
<b>Paramètres pédologiques</b>	<b>Ferrihydrite</b>	--	+	++	+
	<b>Allophane</b>	--	+(-)	+(-)	+(-)
	<b>Carbone</b>	--	-	+	++
<b>Paramètres physiques</b>	<b>Porosité</b>	--	+-	+-	++
	<b>Macroporosité</b>	++	+	-	--
<b>Paramètres Gardner</b>	<b>K<sub>sat</sub></b>	+-	--	--	--
	<b>A</b>	+-	-	-	+-
<b>Paramètres van Genuchten</b>	<b>θ<sub>sat</sub></b>	--	+-	+-	++
	<b>θ<sub>r</sub></b>	+-	--	+	+
	<b>n</b>	-	--	++	++
	<b>α</b>	-	-	++	++

<sup>10</sup> Le signe « - » indique une valeur faible pour le paramètre concerné, et le signe « + » une valeur élevée.

**Tableau 9 : Rappel des tendances observées en horizon B pour les paramètres mesurés**

		<b>Brun rouille</b>	<b>Brun andique</b>	<b>Andosols</b>	<b>Andosols perhydratés</b>
	<b>Altitude [m]</b>	15 - 60	80 - 110	200 - 300	> 300
	<b>Pluviométrie [mm/an]</b>	2500- 2700	2800-3000	3500-4000	> 4000
<b>Paramètres pédologiques</b>	<b>Ferrihydrite</b>	--	+-	++	+
	<b>Allophane</b>	--	+	+	++
	<b>Carbone</b>	--	+-	++	+
<b>Paramètres physiques</b>	<b>Porosité</b>	-	+	+	++
	<b>Macroporosité</b>	+-	+-	+-	+-
<b>Paramètres Gardner</b>	<b>K<sub>sat</sub></b>	+-	-	-	--
	<b><math>\alpha</math></b>	+-	--	--	-
<b>Paramètres van Genuchten</b>	<b><math>\theta_{sat}</math></b>	--	-	+	++
	<b><math>\theta_r</math></b>	++	+-	+-	-
	<b>n</b>	--	--	--	++
	<b><math>\alpha</math></b>	+-	+-	+-	+-

Les sols BR sont donc bien caractérisés par de faibles teneurs en allophane, ferrihydrite et carbone, et les AN et AP, à l'inverse, par des concentrations élevées pour ces éléments. Les sols BA, enfin, sont intermédiaires à ces deux extrêmes pour chacune de ces caractéristiques. Cette affirmation est valable dans les deux sens, les concentrations permettant de déterminer la classe pédologique tout en étant prévisibles sur base de cette même classification.

Les paramètres pédologiques permettent également d'estimer la porosité totale, celle-ci étant corrélée individuellement avec chaque paramètre. La relation la plus fine est entretenue avec la ferrihydrite, indiquant que cet élément est déterminant sur la porosité (figure 20). Ceci est particulièrement vrai lorsque les concentrations mesurées sont importantes.

Cette observation est cohérente avec la théorie, puisque le rôle de la ferrihydrite sur l'agrégation des particules argileuses y est souligné. Il est toutefois surprenant d'observer une meilleure corrélation en altitude, là où les teneurs en argile sont les plus faibles.

La porosité donne quant à elle une image globale de la rétention d'eau dans nos sols. Les sols à forte porosité ont des teneurs en eau résiduelles relativement faibles, au contraire des sols à faible porosité, qui ont des teneurs en eau résiduelles élevées, signe de leurs très fortes teneurs en argile.

Le lien entre porosité et comportement hydrodynamique est par contre plus ténu. Aucune corrélation n'est observée, ni avec les valeurs d'infiltration, ni avec les paramètres de l'équation de Gardner.

Les conclusions sont les mêmes pour la macroporosité. Aucun indicateur de macroporosité utilisant des paramètres hydrodynamiques n'a d'ailleurs pu être validé.

L'infiltration fut déterminée pour des valeurs de succion allant de 0 à 10 cm ; la macroporosité devrait donc représenter un bon indicateur de la courbe de rétention modélisée sur base de ces valeurs. Une réflexion sur les méthodes de caractérisation du comportement hydrodynamique est donc nécessaire.

## Remarque

Les principales difficultés furent rencontrées au niveau de la conductivité. Les données disponibles pour ces paramètres présentent de grandes différences entre horizon A et horizon B. Des tendances plus ou moins claires sont en effet souvent identifiables en horizon B, là où aucune corrélation n'est observée pour l'horizon A.

Sur notre topo-séquence, la démarche hydropédologique dont nous nous revendiquons serait donc plus appropriée en horizon B. Cette remarque est étayée par les ACP réalisées sur les horizons séparés, pour lesquelles les tendances sont similaires mais plus marquées en horizon B. En outre, les variables non significatives en horizon A –  $K_{sat}$  et  $\alpha_{Gardner}$  – gagnent en importance pour cet horizon.

Les contraintes physiques plus nombreuses en horizon A, telles que la compaction fréquente et irrégulière, la plus grande activité biologique, la densité racinaire plus importante, etc., y rendraient la relation entre pédologie et comportement hydraulique plus floue. En particulier, l'irrégularité de ces contraintes induirait une grande variabilité spatiale au niveau du comportement hydrodynamique de l'horizon A, et ce au sein de même des classes pédologiques.

Les relations observées par Dorel *et al* (2000), valables en horizon A comme en horizon B, furent mesurées à l'échelle de la parcelle, et ces contraintes sont donc relativement constantes. Le passage à une échelle supérieure implique une diversification de ces contraintes, qui rend notre démarche difficile pour l'horizon superficiel.

Notre approche est donc plus appropriée en horizon B. Les travaux futurs veilleront à y prêter une attention particulière. Ceci est plus vrai encore dans le cadre d'une approche quantitative.



## **Conclusion**

---

L'accomplissement des objectifs intermédiaires et les analyses statistiques complémentaires nous permettent d'estimer un certain nombre de paramètres à partir de la classification pédologique.

Au niveau du comportement hydrostatique, les sols bruns ont de faibles teneurs en eau à saturation et de fortes teneurs en eau résiduelles, synonymes de microporosité. Ceci illustre leurs teneurs en argile très élevées.

Les andosols ont des teneurs en eau à saturation élevées et des teneurs en eau résiduelles faibles. En outre, la pente de la courbe de rétention est importante et le point d'inflexion se situe systématiquement entre pF 3 et pF 3.5. Leur teneur en eau résiduelle, plus faible que celle des sols bruns mais tout de même de l'ordre de 15%, révèle les teneurs en argile conséquentes de ces sols.

Sur le plan hydrodynamique, les sols BR présentent des valeurs de conductivité à saturation modélisée globalement plus élevées que les autres types de sol.

Expérimentalement, les sols BR infiltrent en effet beaucoup à  $h = 0$  cm, mais cette tendance disparaît dès  $h = 3$  cm. Seuls les sols BA se détachent alors, et certaines mesures exceptionnellement élevées leur confèrent une grande variabilité.

Les comportements hydrostatiques et hydrodynamiques ne concordent donc pas à première vue, et il serait opportun d'établir un lien entre ces deux aspects en vue d'une compréhension plus complète du fonctionnement hydraulique de ces sols. Il s'agit là d'un objectif important pour toute recherche future.

## ***Comparaison avec Dorel et al (2000)***

---

La démarche effectuée dans ce travail ayant été initiée par Dorel *et al* (2000) à une échelle plus réduite, nous allons maintenant revenir sur leurs observations et conclusions afin de déterminer les différences significatives induites par ce changement d'échelle.

Des différences significatives entre teneurs en eau relative proches de la saturation des andosols et des sols bruns furent observées, la perte du caractère andique s'accompagnant d'une diminution progressive de ces teneurs en eau. Cette observation est valable aux deux échelles, nos résultats confirmant les précédents.

Les teneurs en eau des sols diminuent ensuite significativement avec la succion. Cette diminution est plus marquée chez les andosols et surtout plus régulière, ce qui indique une distribution homogène de la porosité pour ces sols. Dans notre cas, la diminution est effectivement plus importante chez les andosols, mais elle est également plus brusque, tandis que la diminution des teneurs en eau des sols bruns est quant à elle progressive. Nous signalons donc ici une différence notoire avec les résultats précédemment présentés.

Une autre différence importante est à signaler : une diminution du volume des andosols (« shrinkage ») fut observée expérimentalement à partir de pF 2 par ces auteurs. Nous n'avons de notre côté pas relevé d'effets similaires pour nos sols, en tout cas jusque pF 3, ces observations n'étant plus possibles à des succions supérieures.

Enfin, les valeurs d'infiltration mesurées sont, comme nous l'avons déjà signalé, significativement différentes chez ces auteurs. Les valeurs obtenues pour les sols BR y sont en effet particulièrement élevées. Ces observations restent globalement valables au regard de nos données, mais les tendances sont nettement plus floues, et il nous est impossible d'être catégorique à ce niveau en raison de la forte variabilité au sein des classes pédologiques.

La diminution de la porosité totale et des teneurs en eau avec la perte des caractéristiques andiques est expliquée par la diminution parallèle des teneurs en allophane, ce matériau montrant une affinité importante pour l'eau. Le rôle de la matière organique est également souligné pour la formation des macropores.

Bien que ces auteurs ne le mettent pas directement en évidence, le rôle de la ferrihydrite est également signalé,

Ces conclusions sont tout à fait cohérentes avec les nôtres.

De même, la différence entre la porosité des horizons A et B est expliquée par la différence de teneurs en allophane de ces horizons. De notre côté, aucune différence ne fut observée entre horizons au niveau de la porosité, mais au niveau des allophanes non plus. Ces interprétations restent donc tout à fait valides.

Notons enfin que la double distribution de la porosité typique des sols à texture argileuse et à structure « pseudo-sableuse » ou « pseudo-limoneuse » décrite par ces auteurs ne se dégage pas aussi clairement dans notre cas. Nous avons d'ailleurs pris soin de ne pas utiliser abusivement ces termes lors de la description de nos courbes de rétention.

## **Perspectives**

---

Nous allons ici lancer quelques pistes pour une éventuelle prolongation de notre recherche.

Tout d'abord, concentrer les recherches sur l'horizon B permettrait d'éliminer les problèmes de variance signalés en horizon A tout en gagnant du temps. Il nous semble donc opportun de se limiter dans un premier temps à cet horizon. La prise en compte de la variabilité spatiale du comportement hydrodynamique de l'horizon A est en effet délicate en raison du nombre important de paramètres à considérer.

Ensuite, comme nous venons de le signaler, les problèmes rencontrés interviennent principalement au niveau du comportement hydrodynamique. La variance importante observée au niveau des mesures d'infiltration induit des difficultés lors de l'interprétation des résultats. Il est donc nécessaire de réaliser un travail de fond sur la collecte de ces données afin de diminuer cette variance et de la comprendre.

L'exploitation des différences entre mesures au double anneau et à l'infiltromètre doit également être envisagée. L'infiltromètre permet des mesures allant jusqu'à  $h = 0$ , et le double anneau mesure l'infiltration à saturation sous pression. La différence entre ces deux mesures n'étant pas significative (l'infiltration mesurée avec le double anneau est unidimensionnelle, à l'inverse de l'infiltration mesurée avec l'infiltromètre), il serait peut-être intéressant de qualifier le profil de propagation de l'eau avec ces deux outils afin de mettre en évidence l'existence éventuelle de flux préférentiels d'eau gravitaire (« bypass flow »).

De même, une compréhension plus fine des processus décrits pourrait être rencontrée en complétant les données pédologiques avec une mesure de la granulométrie. Si les moyens le permettent, la détermination des teneurs en halloysite serait également bénéfique.

Enfin, une fois l'ensemble de ces processus maîtrisés, une approche plus quantitative pourrait être envisagée.

## Conclusion générale

L'objectif final de ce travail est d'estimer le comportement hydraulique des sols d'une séquence d'altération sur base de la classification pédologique. Cette séquence est caractérisée par une diminution des propriétés andiques avec l'altitude.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes intermédiaires ont été définies. Il s'agit d'abord de vérifier la cohérence entre paramètres et classes pédologiques. Ensuite, la corrélation entre la porosité et ces paramètres pédologiques doit être démontrée. Enfin, la porosité doit permettre de prédire le comportement hydraulique des sols concernés.

Les travaux précédents ont permis de sélectionner les paramètres pédologiques intéressants pour notre démarche. Il s'agit des teneurs en ferrihydrite, allophane, carbone organique et argile, en particulier en halloysite. Ces paramètres jouent un rôle important dans les processus d'agrégation, qui sont déterminants pour le comportement hydraulique proche de la saturation, en particulier dans les sols à très forte teneur en argile sur lesquels nous travaillons.

Trois de ces quatre paramètres ont été mesurés, et leur cohérence avec la classification a été mise en évidence. La diminution des teneurs en ferrihydrite, allophane et carbone total parallèlement à l'altération valident donc le premier objectif. Les teneurs en argile ne furent quant à elles pas déterminées dans le cadre de cette étude par manque de temps et de moyens.

Les mesures de porosité totale, effectuées en laboratoire, se sont révélées cohérentes avec l'évolution des paramètres pédologiques. La présence de ces paramètres favorise la porosité totale, qui est donc maximale en haut de la topo-séquence, là où les concentrations les plus fortes en ferrihydrite, carbone et allophane sont observées.

La macroporosité est quant à elle liée aux classes pédologiques, mais sa corrélation avec les concentrations en allophane, ferrihydrite et carbone reste floue.

Le comportement hydraulique fut traité en deux volets. Le premier, consacré aux caractéristiques de rétention d'eau, s'est avéré intimement corrélé à la séquence. Les teneurs en eau à saturation, élevées dans les sols andiques et faibles dans les sols bruns, ainsi que les teneurs en eau résiduelles (à pF 4.1), faibles en andosols et élevées chez les sols bruns, sont corrélées à la porosité.

De même, la courbe de rétention d'eau en fonction de la succion présente une allure très différente selon les sols. La pente de cette courbe est très abrupte en andosols et beaucoup plus douce pour les sols bruns.

Le second volet, consacré au comportement hydrodynamique, posa plus de difficultés. La variabilité des valeurs d'infiltration, très grande au sein des classes pédologiques, rend les observations très vagues et les conclusions incertaines.

Aucune conclusion ne put être tirée en horizon A, où la variabilité des paramètres influençant l'infiltration est très importante. En horizon B, les valeurs de conductivité à saturation ( $K_{sat}$ ) présentent une évolution corrélée à la séquence, les valeurs les plus élevées étant observées pour les sols bruns et les plus faibles pour les andosols.

Une fois ces étapes accomplies, le comportement hydraulique a été mis en lien avec les classes pédologiques. Pour ce faire, un certain nombre d'analyses statistiques furent réalisées.

Les sols brun rouille à halloysite sont donc caractérisés par la porosité la plus faible des sols de la séquence. Leurs teneurs en eau résiduelles sont par contre les plus élevées étant donné

leurs très fortes teneurs en argile (de l'ordre de 80 %). La pente de la courbe de rétention est régulière, indiquant une porosité moyenne répartie.

Sur le plan hydrodynamique, ces sols se distinguent par une conductivité à saturation supérieure à la moyenne.

Les sols bruns andiques présentent les mêmes caractéristiques au niveau du comportement hydrostatique. Au niveau hydrodynamique, ils présentent une variabilité interne très importante, qui empêche toute tentative de caractérisation.

Enfin, les andosols, à l'inverse des sols brun rouille, ont des porosités très élevées et des teneurs en eau résiduelles très faibles. La pente de leur courbe de rétention est très raide, indiquant une porosité irrégulièrement répartie.

Notons toutefois que cette dernière observation est contradictoire avec les conclusions de Dorel *et al* (2000), qui décrivent les andosols comme des sols ayant une porosité dispersée et les sols brun rouille à halloysite comme étant des sols argileux à structure « pseudo-sableuse », caractérisés par une double distribution de la porosité. Cette distribution particulière n'apparaît pas chez nous aussi clairement.

Les valeurs d'infiltration et de conductivité à saturation des andosols sont plus faibles que celles des sols du bas de la topo-séquence.

Nos conclusions recoupent donc dans une large mesure les conclusions de travaux effectués précédemment sur la même séquence mais le long d'un transect de moindre largeur (Dorel *et al*, 2000). Les tendances observées sont toutefois généralement moins claires à notre échelle, en particulier en horizon A.

Ceci s'explique par la grande variabilité des pressions physiques auxquelles sont exposés les horizons A, ce qui résulte en une grande variabilité du comportement hydrodynamique. Le transfert à une échelle plus large de la démarche hydropédologique est donc approprié en horizon B mais s'avère dans notre cas délicate en horizon A, pour lequel il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de paramètres non pédologiques.

Sur le plan pédagogique, ce travail aura sans nul doute été bénéfique.

La campagne de mesure nous aura permis de réaliser, du choix des sites au traitement des échantillons, toutes les étapes de l'acquisition de données. Ces étapes sont nombreuses et sources d'erreur. La qualité des données étant primordiale pour toute recherche, ce travail nous apporte une expérience irremplaçable.

De plus, l'encadrement d'un centre de recherche reconnu et la collaboration avec plusieurs laboratoires universitaires nous ont permis de nous familiariser avec le monde de la recherche.

Le traitement de nos données nous a enfin poussé à nous familiariser avec divers logiciels et techniques de modélisation, et à les utiliser pour des applications concrètes.

Plus globalement, ce travail nous a permis de concilier deux approches différentes et d'en intégrer les processus. Il représente aussi une mise en application concrète des compétences et connaissances acquises au cours de nos études.

Enfin, la gestion de ce travail à long terme représente une expérience irremplaçable, tant sur le plan professionnel que personnel. Il s'agit d'une démarche inédite dans nos études, et la conduite bout en bout de ce projet, de sa définition à la rédaction du travail écrit, complète adéquatement ces années de formation.

## Bibliographie

### Ouvrages référencés dans le texte

Bonan H., Prime J. L., *Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe*, Inspection générale des affaires sociales, Inspection générale de l'environnement, 2001.

Bouma J., *Effects of soil structure, tillage and aggregation upon soil hydraulic properties*, in *Interacting processes in Soil Science* (Wagenet R. J., Bavege P., Stewart B. A.), pp. 1-36, Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 1992.

Cavasino A., *Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des andosols sur un bassin versant cultivé en zone tropicale (Guadeloupe)*, rapport de stage, Ecole Supérieure d'AGRO – Développement International, Cergy-Pontoise, 2005.

Chadwick O. A., Gavenda R. T., Kelly E. F., Ziegler K., Olson C. G., Elliott W. C., Hendricks D. M., *The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils*, Chemical Geology 202, pp 195-223, 2003.

Chaperon P., L'Hôte Y., Vuillaume G., *Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe*, éditions de l'ORSTOM, collection Monographies hydrologiques, 7, 1985.

Charlier J-B, *Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical*, Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur, spécialité Structure et évolution de la Terre et des autres planètes, Université de Montpellier II, France, 2007.

Colmet-Daage F., Lagache P., (de Crécy J., Gautheyrou J., Gautheyrou M., de Lannoy M.), *Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises*, Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, Vol. 3, Num. 2, p. 91-121, 1965.

Colmet-Daage F., Gautheyrou J., Gautheyrou M., de Kimpe C., Fusil G., Sieffermann G., *Dispersion et étude des fractions fines de sols à allophane des Antilles et d'Amérique latine : 2ème partie. Modifications de la nature et de la composition de la fraction inférieure à 2 microns selon la taille des particules*, Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, Vol. 10, Num. 3, p. 219-241, 1972.

Colmet-Daage F., Gautheyrou J., Gautheyrou M., de Kimpe C., Fusil G., *Dispersion et étude des fractions fines de sols à allophane des Antilles et d'Amérique latine : 1ère partie. La dispersion*, Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, Vol. 10, Num. 2, p. 169-191, 1972.

Delvaux B., Tessier D., Herbillon A. J., Burtin G., Jaunet A. M., Vielvoye L., *Morphology, texture, and microstructure of halloysitic soil clays as related to weathering and exchangeable cation*, Clay and Clay Minerals, 40, pp 446-456, 1992.

Dorel M., Roger – Estrade J., *Porosité et propriétés hydriques des sols volcaniques de la Guadeloupe ; Rôle des constituants du sol*, Présentation poster, Enregistrement scientifique n° 1110, Symposium n° 4, 1997 (?).

Dorel M., Roger-Estrade J., Manichon H., Delvaux B., *Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils*, Soil Use and Management 16, pp. 133-140, 2000.

Dorel M., *Effet des pratiques culturelles sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier*, Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2001.

Gaumand C., Gravaud A., de Verdelon X., Vernerey M., *Rapport d'enquête : Evaluation des actions menées en rapport avec la présence de chlordécone et autres pesticides organochlorés en Guadeloupe et en Martinique*, Inspection générale des affaires sociales, Comité permanent de coordination des inspections du ministère de l'agriculture, inspection générale de l'environnement, inspection générale des finances, 2005.

Henao-Toro M. C., *Dynamique d'éléments fertilisants dans des sols dérivés de cendres volcaniques de la zone caféière centrale de Colombie, sous culture de bananier plantain*, Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2002.

Henriet C., *Silicon in banana (Musa spp.): a soil-plant system approach*, Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2008.

Javaux M., *Hydrologie générale : Notes de cours*, Université Catholique de Louvain, 2007.

Javaux M., Bielders C., *Détermination de la courbe de conductivité hydraulique*, Notes du cours *Physique du sol*, Université Catholique de Louvain, 2007.

Lin H. S., Mc Innes K. J., Wilding L. P., Hallmark C. T., *Effects of Soil Morphology on Hydraulic Properties : I. Quantification of Soil Morphology*, Soil Science Society of America Journal, 63, pp 948-954, 1999(a).

Lin H. S., Mc Innes K. J., Wilding L. P., Hallmark C. T., *Effects of Soil Morphology on Hydraulic Properties : II. Hydraulic Pedotransfer Functions*, Soil Science Society of America Journal, 63, pp 955-961, 1999(b).

Lin H., Bouma J., Wilding L. P., Richardson J. L., Kutílek M., Nielsen D. R., *Advances in Hydropedology*, Advances in Agronomy, Vol. 85, 2005.

Mizota C., van Reeuwijk L. P., *Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions*, International soil reference and information centre, Wageningen, 1989.

Ndayiragije S., *Caractérisation d'une séquence d'altération de sols dérivés de matériaux pyroclastiques sous climat tropical humide des Antilles (Guadeloupe)*, Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur, Université Catholique de Louvain, Belgique, 1996.

Perpina C., *Spatialisation des propriétés hydrodynamiques du sol, en relation avec les pratiques culturelles et la toposéquence en zone bananière de Guadeloupe*, Mémoire de fin d'études, Institut National de l'Horticulture, France, 2001.

Pochet G., Van der Velde M., Vanclooster M., Delvaux B., *Hydric properties of high charge, halloysitic clay soils from the tropical South Pacific region*, Geoderma 138, pp. 96-109, 2007.

Reynolds W. D., Elrick D. E., *Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer*, Soil Science Society of America Journal 55, pp. 633-639, 1991.

Uehara G., Gillman G., *The Mineralogy, Chemistry and Physics of Tropical Soils with Variable Charge Clays*, Westview Tropical Agriculture Series, n° 4, Boulder, Colorado, 1981.

Vanclooster M., *Hydrologie générale : Notes de cours de la partie infiltration*, Université Catholique de Louvain, 2005.

Vanclooster M., Lambot S., Javaux M., *TP7 : le perméamètre à succion*, Notes du cours *Hydrodynamique des sols*, Université Catholique de Louvain, 2006.

Van Wambeke A., *Soils of the Tropics*, version informatique (CD-ROM) mise à jour de *Soils of the Tropics, Properties and Appraisal (1991)*, 2002.

West S. L., White G. N., Deng Y., Mc Innes K. J., Juo A. S. R., Dixon J. B., *Kaolinite, Halloysite, and Iron Oxide Influence on Physical Behavior of Formulated Soils*, Soil Science Society of America Journal, 68, pp 1452-1460, 2004.

## **Ouvrages de référence**

---

*Atlas des Départements Français d'Outre Mer, vol. 3 : la Guadeloupe*, CNRS Bordeaux-Talence, France, 1982.

## **Sites internet**

---

Site officiel du Ministère de l'intérieur, de l'Outre Mer et des Collectivités territoriales (<http://www.outre-mer.gouv.fr/outremer/>, Janvier 2008).

*La Guadeloupe en chiffre*, site officiel de la Région Guadeloupe ([http://www.cr-guadeloupe.fr/archipel/?ARB\\_N\\_ID=731&ARB\\_N\\_S=734](http://www.cr-guadeloupe.fr/archipel/?ARB_N_ID=731&ARB_N_S=734), Février 2008).

Atlas du parc national de Guadeloupe (<http://atlas.parcsnationaux.org/guadeloupe/sommaire.asp?titre=Sommaire>, Février 2008).

*Méthode d'analyse: Détermination de la matière organique par dosage du carbone organique dans les sols agricoles: méthode Walkley-Black modifiée*, Centre d'expertise en analyse environnementale au Québec, 2003.  
(<http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accréditation/palaa/pdf/MA1010WB10.pdf>, Juillet 2008).